



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Química

ALINE GALLO DE MITRI

FLUIDODINÂMICA DA MISTURA DE BIOMASSA (PALHA DE MILHO) E INERTE
EM LEITO FLUIDIZADO GASOSO

CAMPINAS

2019

ALINE GALLO DE MITRI

FLUIDODINÂMICA DA MISTURA DE BIOMASSA (PALHA DE MILHO) E INERTE
EM LEITO FLUIDIZADO GASOSO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Química.

Orientadora: KATIA TANNOUS

ESTE ARQUIVO DIGITAL
CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA
PELA ALUNA ALINE GALLO DE
MITRI E ORIENTADA PELA PROFA.
DRA. KATIA TANNOUS

CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

D594f De Mitri, Aline Gallo, 1990-
Fluidodinâmica da mistura de biomassa (palha de milho) e inerte em leito fluidizado gasoso / Aline Gallo De Mitri. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Katia Tannous.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Biomassa. 2. Leito fluidizado. 3. Misturas binárias. 4. Engenharia química - Modelos matemáticos. I. Tannous, Katia, 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Fluid dynamics of biomass (corn straw) and inert mixtures in gaseous fluidized bed

Palavras-chave em inglês:

Biomass

Fluidized bed

Binary mixture

Chemical engineering - mathematical models

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Mestra em Engenharia Química

Banca examinadora:

Katia Tannous [Orientador]

Guilherme José de Castilho

Ana Silvia Prata Soares

Data de defesa: 30-07-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-5412-3706>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4894245383473105>

Agência de fomento/fundo de apoio e números de processos: CAPES, Código de Financiamento 001; FAEPEX, processo nº 2957/17.

Folha de Aprovação da Dissertação de Mestrado defendida por Aline Gallo De Mitri e aprovada em 30 de julho de 2019 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

PROFA. DRA. KATIA TANNOUS
FEQ/UNICAMP

PROF. DR. GULHERME JOSÉ DE CASTILHO
FEQ/UNICAMP

PROFA. DRA. ANA SILVIA PRATA SOARES
FEA/UNICAMP

Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-Graduação da FEQ/UNICAMP.

*Dedico este trabalho ao Vô Gallo, que com
muito zelo plantou e fez crescer o milharal que
forneceu a palha de milho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter guiado meu caminho até aqui e por todas as oportunidades que surgiram no percurso.

Agradeço aos meus pais, Adriana e Giuseppe, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. E à minha irmã, Alicia, por me ensinar a ser uma pessoa melhor todos os dias.

Agradeço à Professora Kátia pela orientação e ensinamentos.

Agradeço aos familiares e amigos pelo carinho e companheirismo que me motivam e suportam no dia-a-dia. De forma especial, quero agradecer às minhas grandes amigas de profissão e da vida, Emily, Vanessa e Thais, pelos 10 anos de amizade completados este ano. Vocês são minha inspiração! Não posso deixar de agradecer também à Stefania, a melhor amiga que alguém poderia ter, por me ouvir e sempre ter uma palavra de conselho.

Agradeço aos companheiros de laboratório e aos amigos que fiz nesta jornada chamada mestrado: pelos almoços, discussões e convívio diário. Vocês tornam meus dias muito melhores!

Agradeço ao Felipe, pela ajuda com os gráficos de flutuação de pressão e espectros de potência, pela paciência e suporte nos momentos difíceis da jornada e, principalmente, pelo amor e carinho incomensuráveis que recebo todos os dias.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES, Código de Financiamento 001) e do Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAEPEX, processo nº 2957/17).

RESUMO

Este trabalho objetiva caracterizar o comportamento fluidodinâmico da mistura binária da biomassa palha de milho e inerte (areia), a fim de investigar sua aplicabilidade em processos que utilizam leitos fluidizados gasosos. Os materiais sólidos foram caracterizados mediante as propriedades físicas como diâmetro médio de Sauter por peneiramento, esfericidade pela análise de imagens das partículas usando software APOGEO e massa específica aparente via porosimetria de mercúrio. Para a palha de milho, foram obtidos diâmetros médios de 0,253 mm, 0,496 mm e 0,962 mm, esfericidade entre 0,18 e 0,32 e massa específica aparente de 936 kg/m³. A areia utilizada foi de diâmetro médio de 0,335 mm, esfericidade de 0,85 e massa específica de 2636 kg/m³. Os experimentos de fluidodinâmica foram realizados em uma coluna de acrílico alimentada com ar comprimido e em temperatura ambiente. As misturas estudadas foram baseadas em cinco razões de frações mássicas entre biomassa e areia, de 2,5 m-%, 5,0 m-%, 7,5 m-%, 10,0 m-% e 12,5 m-% e três razões de diâmetro entre os materiais (0,76, 1,48 e 2,87). Os ensaios fluidodinâmicos permitiram a determinação das velocidades características de fluidização inicial (U_{fi}), aparente (U_{fa}), de segregação (U_s) e completa (U_{fc}), além das porosidades aparente (ϵ_{fa}) e completa (ϵ_{fc}) do leito. Os métodos utilizados para a identificação destes parâmetros foram: queda de pressão total, desvio padrão das flutuações de pressão, expansão do leito, inspeção das flutuações de pressão e espectro de potência. As velocidades, em geral, aumentaram com o aumento da razão de diâmetro e razão de fração mássica entre as partículas, sendo a variação mais expressiva (maiores que 100%) com o aumento da primeira variável, principalmente entre as razões de diâmetro 0,76 e 1,48. A porosidade aparente do leito também aumentou com as mesmas razões, mas neste caso, a razão de fração mássica teve influência mais expressiva (aumento entre 24,5% e 37,0%) do que a razão de diâmetro (máximo de 21,5%). A porosidade completa apresentou menor influência de ambas as variáveis fluidodinâmicas, com um aumento máximo de 15%. Os comportamentos de fluidização observados foram leito fixo, segregação total, segregação parcial e mistura completa, na qual se verificou intermitência entre borbulhamento e empistonamento. As velocidades características identificadas experimentalmente foram comparadas através de valores teóricos mediante correlações da literatura. U_{fa} teve erro relativo médio absoluto entre 22,12% e 30,61% considerando correlações de misturas de partículas, enquanto este mesmo erro foi entre 23,97% e 696,55% utilizando correlações de misturas de biomassa e inerte. A U_{fc} apresentou erro relativo médio absoluto entre 38,96% e 146,6%, U_{fi} entre 21,55% e 31,0% e U_s de 25,81%, considerando uma única correlação

encontrada para esta velocidade. Por fim, novas correlações empíricas foram propostas para possibilitar o cálculo destas velocidades características considerando os dados experimentais desta dissertação e da literatura. As correlações apresentaram boa concordância, com erros relativos menores que 30,1%, o que é comparável com outras correlações da literatura.

Palavras-chave: biomassa, leito fluidizado, mistura binária, modelagem empírica

ABSTRACT

This research aims to characterize the fluid dynamics behavior of corn straw biomass with an inert (sand) in order to investigate its applicability in gaseous fluidized bed processes. Initially, several material characteristics were determined such as Sauter mean diameter by granulometric distribution, sphericity by particle image analysis using APOGEO software and particle density by mercury porosimetry. The corn straw mean diameter were 0.253 mm, 0.796 mm and 0.983 mm; sphericity between 0.19 and 0.32 and particle density of 936 kg/m³. The sand mean diameter was 0.335 mm, sphericity of 0.85 and particle density of 2636 kg/m³. The fluid dynamic study was executed in an acrylic column fed with compressed air at room temperature. The binary mixtures had mass fraction ratio between biomass and inert of 2.5 w-%, 5.0 w-%, 7.5 w-%, 10.0 w-% and 12.5 w-% and diameter ratio between particles of 0.76, 1.48 and 2.87. The initial (U_{if}), apparent (U_{af}), of segregation (U_s) and complete (U_{cf}) velocities were obtained by mean pressure drop, standard deviation of pressure fluctuations, bed expansion, pressure fluctuations inspection and power spectral methods. In general, the characteristic velocities increased with the increase of the diameter and mass fraction ratio between materials, however, a more expressive variation was observed for the first ratio, specially between 0.76 and 1.48 with increase higher than 100% for all the velocities. The apparent bed porosity (ε_{fa}) also enhanced with the increase of diameter and mass fraction ratios, nevertheless, the mass ratio was more expressive (increase between 24.5% and 37.0%) than the diameter ratio (21.5% maximum). The complete bed porosity (ε_{fc}) showed low influence of particle characteristics with a maximum increase of 15.0%. The fluid dynamic behaviors observed were fixed bed, total segregation, partial segregation and complete mixture, in which bubbling and slugging intermittence were verified. The empirical characteristic velocities were compared with theoretical values calculated from literature correlations. U_{af} presented an absolute mean relative error between 22.12% and 30.61% considering inert particle mixtures correlations, and between 23.97% and 696.55% for biomass and inert mixtures correlations. U_{cf} showed absolute mean relative error between 38.96 and 146.6%, U_{if} between 21.55% and 31.0% and U_s of 25.81%. Therefore, new empirical correlations were proposed in order to calculate the characteristic velocities in otherwise situations than experimental, taking into consideration the empirical data from this work and from literature. The new correlations were in good agreement with data presenting relative errors lesser than 30,1% which is comparable with other correlations.

Keywords: biomass, fluidized bed, binary mixture, empirical models

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 Representação esquemática das partes da planta do milho.....	25
Figura 3.2 Queda de pressão do leito em função da velocidade superficial do gás para partículas homogêneas.....	29
Figura 3.3 Diferentes formatos de pistão: (a) pistão simétrico, (b) pistão de parede e (c) pistão completo.....	30
Figura 3.4 Flutuações de pressão e espectros de potência obtidos por Johnsson et al. (2000).....	33
Figura 3.5 Flutuações de pressão e espectros de potência de diferentes estados obtidos por Felipe (2004) (CMC: $d_p = 0,329$ mm, $\rho_p = 980$ kg/m ³).....	35
Figura 3.6 Arranjo de misturas de partículas binárias (inerte e biomassa) em um leito fluidizado gasoso com a diminuição da velocidade do gás.....	37
Figura 3.7 Esquema para a identificação de velocidades e comportamentos fluidodinâmicos para misturas de milho e areia.....	39
Figura 3.8 Diferenças observadas na curva da queda de pressão para a fluidização e defluidização de um sistema de partículas polidisperso.....	40
Figura 4.1 Indicação do resíduo da cultura de milho utilizado.....	54
Figura 4.2 Areia utilizada como inerte nos experimentos.....	54
Figura 4.3 Imagens da seleção de amostras (palha de milho, $d_m = 0,510$ mm).....	56
Figura 4.4 Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter para a areia.....	59
Figura 4.5 Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter para a palha de milho.....	60
Figura 4.6 Imagens da palha de milho após moagem e peneiramento.....	60
Figura 4.7 Amostragem de partículas digitalizadas (palha de milho, $dp = 0,962$ mm).....	61
Figura 4.8 Esquema do formato aproximado das partículas de biomassa.....	61
Figura 4.9 Esboço da circunferência inscrita e circunscrita à partícula de biomassa na forma retangular.....	62
Figura 4.10 Esboço da esfera circunscrita à partícula em formato paralelepípedo.....	63
Figura 4.11 Esfericidade em função da porosidade do leito considerando partículas uniformes.....	71
Figura 4.12 Esquema do aparato experimental utilizado nos ensaios fluidodinâmicos.....	72
Figura 4.13 Exemplo de identificação dos parâmetros fluidodinâmicos da mistura binária (palha de milho/ areia: $dp = 0,496$ mm/ $0,335$ mm; $\chi = 7,5$ m-%).....	74
Figura 4.14 Exemplo da flutuação de pressão (a) e espectro de potência (b).....	76
Figura 4.15 Identificação experimental dos parâmetros fluidodinâmicos do material inerte.....	79

Figura 5.1 Evolução da queda de pressão total em função da velocidade do gás para as diferentes razões de fração mássica e de diâmetro entre biomassa e inerte	82
Figura 5.2 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade do gás para as diferentes razões de fração mássica e de diâmetro entre biomassa e inerte.....	84
Figura 5.3 Evolução da expansão do leito em função da velocidade do gás para as diferentes razões de fração mássica e de diâmetro entre biomassa e inerte	86
Figura 5.4 Velocidades características em função da razão de diâmetro	91
Figura 5.5 Velocidades características em função da razão de fração mássica entre biomassa e inerte	93
Figura 5.6 Porosidade do leito em função da razão de diâmetro.....	96
Figura 5.7 Porosidade do leito em função da razão de fração mássica de biomassa e inerte..	96
Figura 5.8 Comparação entre velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) teórica e experimental - correlações a partir da mistura de inertes	99
Figura 5.9 Comparação entre velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) teórica e experimental - correlações a partir da mistura de biomassa e inerte	100
Figura 5.10 Comparação entre a velocidade de fluidização completa experimental e calculada por diferentes correlações da literatura.....	102
Figura 5.11 Comparação entre a velocidade de fluidização inicial experimental e calculada por diferentes correlações da literatura.....	103
Figura 5.12 Comparação entre a velocidade de segregação experimental e calculada pela correlação de Tannous e Lourenço (2015)	104
Figura 5.13 Imagem do leito (a), flutuação de pressão (b) e espectro de potência (c) no leito fixo. Ensaio: Areia, $U = 0,063$ m/s	105
Figura 5.14 Esquema ilustrativo (a), flutuação de pressão (b) e espectro de potência (c) dos diferentes estados fluidodinâmicos para as partículas de areia	106
Figura 5.15 Diagrama de identificação dos diferentes comportamentos fluidodinâmicos: (a) leito fixo, (b) segregação total, (c) segregação parcial e (d) mistura completa.	108
Figura 5.16 Imagem do leito, flutuação de pressão e espectro de potência no leito fixo ($U < U_{fi}$).	110
Figura 5.17 Esquema ilustrativo, flutuação de pressão e espectro de potência para os diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Ensaio: $D = 0,76$; $\chi = 10,0$ m-%.....	112
Figura 5.18 Esquema ilustrativo, flutuação de pressão e espectro de potência para os diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Ensaio: $D = 1,48$; $\chi = 10,0$ m-%.....	113

Figura 5.19 Esquema ilustrativo, flutuação de pressão e espectro de potência para os diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Ensaio: $D = 2,87$; $\chi = 10,0$ m-%.....	114
Figura 5.20 Comparação entre as velocidades de fluidização aparente experimentais e calculadas pela nova correlação	120
Figura 5.21 Comparação entre as velocidades de fluidização completa empíricas e calculadas pela nova correlação	122
Figura 5.22 Comparação entre as velocidades de fluidização inicial empíricas e calculadas pela nova correlação	123
Figura 5.23 Comparação entre as velocidades de segregação empíricas e calculadas pela nova correlação.....	124
Figura A.1 Distribuição granulométrica dos ensaios do planejamento.....	137
Figura A.2 Fração retida em cada ensaio nas peneiras com diâmetro de abertura de 0,256 mm, 0,513 mm e 1,02 mm.....	137
Figura A.3 Distribuição granulométrica do ensaio 6 (E6) e suas repetições (E6_A, E6_B e E6_C).....	138
Figura B.1 Curva de calibração do transdutor de pressão diferencial - pressão diferencial em função da voltagem.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Estudos fluidodinâmicos da mistura biomassa e inerte disponíveis nos últimos cinco anos de literatura	42
Tabela 3.2 Correlações empíricas desenvolvidas para a velocidade de fluidização aparente considerando misturas de inertes e biomassas.....	46
Tabela 3.3 Estudos da literatura para a obtenção de correlações empíricas para a velocidade de fluidização completa de misturas binárias	51
Tabela 3.4 Estudos da literatura para a obtenção de correlações empíricas para a velocidade de fluidização inicial para misturas binárias.....	53
Tabela 3.5 Estudo da literatura para a obtenção de correlação empírica para a velocidade de segregação para misturas binárias	53
Tabela 4.1 Primeira etapa de amostragem das biomassas	56
Tabela 4.2 Peneiras aplicadas na identificação da distribuição granulométrica.....	58
Tabela 4.3 Dimensões e razões de aspecto das partículas	64
Tabela 4.4 Esfericidade das partículas determinadas por diferentes definições.....	64
Tabela 4.5 Incerteza percentual entre os métodos de esfericidade	65
Tabela 4.6 Massa específica aparente dos materiais	67
Tabela 4.7 Correlações para o cálculo de U_{mf} de partículas homogêneas	68
Tabela 4.8 Propriedades das partículas e parâmetros fluidodinâmicos teóricos	69
Tabela 4.9 Identificação das velocidades características em cada metodologia	80
Tabela 5.1 Parâmetros fluidodinâmicos do inerte na condição de mínima fluidização	87
Tabela 5.2 Parâmetros fluidodinâmicos experimentais da mistura de palha de milho e areia	88
Tabela 5.3 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades de fluidização aparente teóricas obtidas por diferentes correlações.....	98
Tabela 5.4 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades de fluidização completa teóricas obtidas por diferentes correlações.....	101
Tabela 5.5 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades teóricas de fluidização inicial e de segregação obtidas por diferentes correlações	103
Tabela 5.6 Novas correlações empíricas para o cálculo da velocidade de fluidização aparente de misturas binárias	119
Tabela 5.7 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades de fluidização aparente teóricas obtidas por diferentes correlações.....	120
Tabela A.1 Níveis de cada fator avaliado no planejamento 2^3	136

Tabela A.2 Matriz de planejamento.....	136
Tabela A.3 Diâmetro médio de Sauter para cada ensaio do planejamento	138
Tabela A.4 Frações retidas nos ensaios de repetição do Ensaio 6.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de Variância
CMC	Celulose microcristalina
CRC	Laboratório de Revestimentos Cerâmicos
DETF	Departamentos de Engenharia Térmica e de Fluidos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Endo.	Endocarpo
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ER	Erro relativo
ERMA	Erro relativo médio absoluto
FCC	Craqueamento Catalítico Fluidizado – <i>Fluid Catalytic Cracking</i>
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
FEQ	Faculdade de Engenharia Química
FFT	Transformada Rápida de Fourier - <i>Fast Fourier Transform</i>
HLPE	Painel de Especialistas de Alto Nível em Segurança Alimentar e Nutrição - <i>High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
LaProM	Laboratório de Tecnologia de Partículas e Processos Multifásicos
Mad.	Madeira
SP	São Paulo
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Comprimento da partícula	[mm]
A, B	Constantes da correlação de Noda et al. (1986)	[-]
A_1, A_2, A_3	Constantes da correlação de Vasconcelos et al. (2018)	[-]
A_c	Área da seção transversal do leito	[m ²]
Ar	Número de Arquimedes	[-]
Ar_M	Número de Arquimedes da mistura	[-]
A_{se}	Área superficial da esfera de mesmo volume da partícula	[mm ²]
A_{sp}	Área superficial da partícula	[mm ²]
b	Largura da partícula	[mm]
B_1, B_2	Constantes da correlação do tipo 1	[-]
b_1, b_2	Parâmetros do modelo linear de ajuste	[-]
c	Espessura da partícula	[mm]
C_1, C_2	Constantes da correlação de Si e Guo (2008)	[-]
C_D	Coefficiente de arraste	[-]
D	Razão de diâmetro médio	[-]
$d_{\#}$	Diâmetro de abertura de peneira	[mm]
$d_{\#-}$	Diâmetro de abertura da peneira inferior	[mm]
$d_{\#+}$	Diâmetro de abertura da peneira superior	[mm]
d_{cc}	Diâmetro da circunferência circunscrita	[mm]
d_{ci}	Diâmetro da circunferência inscrita	[mm]
d_m	Diâmetro médio de peneira	[mm]
\bar{d}_M	Diâmetro de mistura	[m]
d_p	Diâmetro médio de partícula	[mm]
\bar{d}_p	Diâmetro médio de Sauter	[mm]
$\bar{d}_{p,b}$	Diâmetro médio de partícula de biomassa	[mm]
d_{pe}	Diâmetro de mistura efetiva para Zhong et al. (2008) e Oliveira et al. (2013)	[m]
dp_{eff}	Diâmetro de mistura efetivo para Rao e Bheemarasetti (2001)	[m]
$\bar{d}_{p,i}$	Diâmetro médio de partícula de inerte	[mm]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Altura média do leito	[m]
J_1, J_2	Constantes da correlação do tipo 1	[-]
k	Constante da correlação de Rao e Bheemarasetti (2001)	[-]
K	Constante da correlação do tipo 4	[-]
K_1, K_2	Constantes da correlação de Wen e Yu (1966)	[-]
L	Número de sinais do subespectro	[-]
L_0	Altura do leito fixo	
m_a	Massa de amostra	[kg]
m_b	Massa de biomassa	[kg]
m_f	Massa final do ensaio de porosimetria	[kg]
m_{Hg}	Massa de mercúrio adicionada ao penetrômetro	[kg]
$m_{Hg,a}$	Massa de mercúrio que ocupa o mesmo volume da amostra	[kg]

$m_{Hg,pv}$	Massa de mercúrio que ocupa o penetrômetro vazio	[kg]
m_i	Massa de material retida na peneira	[g]
m_i	Massa de inerte	[kg]
m_{pn}	Massa do penetrômetro	[kg]
m_t	Massa total de material retida no peneiramento	[g]
m_T	Massa total de partículas no leito fluidizado	[g]
M	Massa de material	[kg]
M_v	Número de massa específica	[-]
N	Número de registros	[-]
p	Constante da correlação do tipo 3	[-]
q	Constante da correlação do tipo 3	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
S	Número de subspectros	[-]
U	Velocidade superficial do gás	[m/s]
U_F	Velocidade de mínima fluidização do componente fluido	[m/s]
U_{fa}	Velocidade de fluidização aparente	[m/s]
U_{fc}	Velocidade de fluidização completa	[m/s]
U_{fi}	Velocidade de fluidização inicial	[m/s]
U_G	Velocidade de mínima fluidização da partícula de maior tamanho	[m/s]
U_k	Velocidade de mínima fluidização da partícula de menor tamanho	[m/s]
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
$U_{mf,b}$	Velocidade de mínima fluidização da biomassa	[m/s]
$U_{mf,i}$	Velocidade de mínima fluidização do inerte	[m/s]
U_P	Velocidade de mínima fluidização do componente empacotado	[m/s]
U_s	Velocidade de segregação	[m/s]
U_t	Velocidade terminal da partícula	[m/s]
V	Voltagem	[V]
V_a	Volume de amostra	[m ³]
V_{ec}	Volume da esfera circunscrita ao sólido	[mm ³]
V_{pn}	Volume do penetrômetro	[m ³]
V_s	Volume do sólido	[mm ³]
w	Função janela de Hanning	[-]
x_1, x_2	Variáveis dependentes da equação linearizada, Equação 5.7	
x_b	Fração mássica de biomassa	[-]
x_i	Fração mássica de inerte	[-]
x_j	Fração de material retida na peneira j	[-]
X	Constante da correlação do tipo 4	[-]
y	Variável independente da equação linearizada, Equação 5.7	
\bar{y}	Valor médio de uma característica, Equação 4.1	
y_{exp}	Medida experimental de uma característica, Equação 4.4	
y_i	Amostra i de determinada característica, Equação 4.1	
y_{teo}	Medida teórica de uma característica, Equação 4.4	
Z_1, Z_2	Constantes da correlação do tipo 2	[-]

Letras Gregas

α	Constante da correlação do tipo 4	
$\Delta\bar{P}$	Queda de pressão	[Pa]
ΔP_i	Registro de pressão diferencial	[Pa]
ΔP^s	Subespectro de potência	[Pa]
Δt	Intervalo de registro do sinal	[s]
ε	Expansão do leito	[-]
ε_0	Porosidade do leito fixo	[-]
ε_{fa}	Porosidade aparente do leito	[-]
ε_{fc}	Porosidade completa do leito	[-]
ε_{mf}	Porosidade do leito na mínima fluidização	[-]
λ	Incerteza percentual	[%]
μ	Viscosidade dinâmica do gás	[kg/m.s]
ρ	Massa específica do gás	[kg/m ³]
ρ_{ap}	Massa específica aparente	[kg/m ³]
ρ_{eff}	Massa específica de mistura efetiva para Rao e Bheemarasetti (2001)	[kg/m ³]
ρ_{Hg}	Massa específica do mercúrio	[kg/m ³]
$\bar{\rho}_M$	Massa específica de mistura	[kg/m ³]
ρ_p	Massa específica da partícula	[kg/m ³]
$\rho_{p,b}$	Massa específica da partícula de biomassa	[kg/m ³]
$\rho_{p,i}$	Massa específica da partícula de inerte	[kg/m ³]
ρ_{pe}	Massa específica de mistura efetiva para Zhong et al. (2008) e Oliveira et al. (2013)	[kg/m ³]
σ	Desvio padrão	[Pa]
σ_c	Desvio padrão das amostras de uma característica, Equação 4.2	
φ	Esfericidade da partícula	[-]
φ_b	Esfericidade da partícula de biomassa	[-]
φ_c	Esfericidade segundo Curray (1951)	[-]
φ_i	Esfericidade da partícula de inerte	[-]
φ_M	Esfericidade de mistura	[-]
φ_r	Esfericidade segundo Riley (1941)	[-]
φ_r	Esfericidade segundo Massarani e Peçanha (1986)	[-]
φ_w	Esfericidade segundo Wadell (1935)	[-]
χ	Razão de fração mássica	[%]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	22
2.	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	23
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1.	<i>A Biomassa</i>	24
3.2.	<i>Aplicação de Leitos Fluidizados no Processamento de Biomassas</i>	26
3.3.	<i>Fluidodinâmica de Partículas Homogêneas</i>	29
3.3.1.	Identificação de Regimes Fluidodinâmicos de Partículas Homogêneas	31
3.4.	<i>Fluidodinâmica de Misturas Binárias</i>	36
3.4.1.	Identificação de Velocidades e Comportamentos Característicos de Misturas Binárias	38
3.5.	<i>Estudos de Fluidização de Misturas Binárias com Biomassas</i>	40
3.5.1.	Influência do Diâmetro das Partículas	43
3.5.2.	Influência da Razão de Fração Mássica de Biomassa	43
3.6.	<i>Metodologias para o Estudo Fluidodinâmico</i>	44
3.7.	<i>Correlações Empíricas da Literatura para Parâmetros Fluidodinâmicos de Misturas de Partículas Sólidas</i>	45
3.7.1.	Velocidade de Fluidização Aparente	45
3.7.2.	Velocidade de Fluidização Completa	50
3.7.1.	Velocidades de Fluidização Inicial e de Segregação.....	52
4.	MATERIAL E MÉTODOS	54
4.1.	<i>Materiais sólidos selecionados</i>	54
4.2.	<i>Moagem da Biomassa</i>	55
4.3.	<i>Amostragem</i>	55
4.4.	<i>Análise Estatística</i>	57
4.5.	<i>Distribuição Granulométrica e Diâmetro Médio das Partículas</i>	58
4.6.	<i>Esfericidade</i>	59

4.7.	<i>Massa Específica Aparente</i>	66
4.8.	<i>Estudo dos Parâmetros Fluidodinâmicos para Partículas Homogêneas</i>	68
4.8.1.	Velocidade Mínima de Fluidização	68
4.8.2.	Velocidade Terminal das Partículas	69
4.8.3.	Porosidade do Leito	70
4.9.	<i>Aparato Experimental</i>	71
4.10.	<i>Procedimento Experimental</i>	72
4.11.	<i>Metodologias para Tratamento de Dados</i>	73
4.12.	<i>Definição dos Parâmetros Fluidodinâmicos</i>	78
4.1.	<i>Definição das Variáveis Fluidodinâmicas</i>	80
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5.1.	<i>Análise dos Resultados Baseada em cada Metodologia Aplicada</i>	81
5.1.1.	Evolução da Queda de Pressão Total	81
5.1.2.	Evolução do Desvio Padrão das Flutuações de Pressão	83
5.1.3.	Evolução da Expansão do Leito	85
5.2.	<i>Parâmetros Fluidodinâmicos Experimentais do Material Inerte</i>	87
5.3.	<i>Parâmetros Fluidodinâmicos Experimentais das Misturas Binárias</i>	88
5.3.1.	Velocidades Características de Fluidização	88
5.3.2.	Influência da Razão de Diâmetro	89
5.3.3.	Influência da Razão de Fração Mássica	92
5.3.4.	Influência das Variáveis Fluidodinâmicas sobre a Porosidade do Leito	95
5.4.	<i>Análise Comparativa entre Dados Experimentais e Correlações da Literatura</i>	97
5.4.1.	Velocidade de Fluidização Aparente	97
5.4.2.	Velocidade de Fluidização Completa	101
5.4.3.	Velocidade de Fluidização Inicial e de Segregação	102
5.5.	<i>Identificação dos Comportamentos Fluidodinâmicos</i>	104
5.5.1.	Partículas Homogêneas.....	104

5.5.2.	Misturas Binárias.....	107
5.6.	<i>Elaboração de Novas Correlações para os Parâmetros Fluidodinâmicos.....</i>	<i>116</i>
5.6.1.	Velocidade de Fluidização Aparente.....	116
5.6.2.	Velocidade de Fluidização Completa.....	121
5.6.3.	Velocidade de Fluidização Inicial e de Segregação.....	122
6.	CONCLUSÕES.....	125
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	126
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
	ANEXO A - Estudo para a Moagem da Palha de Milho.....	136
	ANEXO B – Curva de Calibração do Transdutor de Pressão.....	140

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia renováveis é movida pela percepção de que as fontes atuais, na sua maioria dependente de combustíveis fósseis, trazem diversos problemas à sociedade. Sua utilização leva à formação de compostos poluentes, que causam desequilíbrios nos ecossistemas terrestres e problemas de saúde na população. Sua procedência é restrita a locais específicos do planeta, os quais estão fadados a incertezas mercadológicas ligadas a balanças comerciais e interesses políticos. Além de sua oferta ser finita, pois se trata de uma fonte não renovável.

Os caminhos trilhados por esta busca levaram às biomassas, materiais orgânicos de origem animal ou vegetal, que possuem potencial de se tornarem fontes de energia, principalmente térmica e elétrica. Este potencial vem se confirmando em vários casos de sucesso, como no Brasil, em que a produção atual de energia elétrica por biomassa corresponde a 8,74%, com 559 usinas em operação fornecendo 14,7 GW (ANEEL, 2018).

O uso da biomassa vegetal, entretanto, apresenta alguns inconvenientes que ainda precisam ser estudados e minimizados, como a elevada quantidade de oxigênio, a qual aumenta sua oxidação durante a conversão; o alto teor de umidade, gerador de uma natureza hidrofílica, que potencializa a degradação biológica e diminui sua validade quando armazenado; o baixo poder calorífico quando comparado aos combustíveis fósseis, além de sua composição heterogênea, tanto com relação a aspectos químicos quanto a aspectos físicos, como tamanho, formato e massa específica, os quais dificultam o projeto e o controle dos processos de conversão.

Dentre as tecnologias em desenvolvimento para a conversão da biomassa em energia, destacam-se aquelas baseadas na transformação termoquímica dos materiais, ou seja, na queima da biomassa em condições específicas que promovam a geração de energia ou de produtos, como metano (CH_4), hidrogênio (H_2), bio-óleo e biocarvão, que posteriormente se tornam uma fonte energética. Os principais equipamentos que realizam esta conversão utilizam em suas operações a tecnologia do leito fluidizado, porque esta promove boas condições de mistura entre o sólido e os gases, além de altas taxas de transferência de calor e de massa (BASU, 2018). Vale ressaltar que esta tecnologia também é aplicada em outras etapas do processo, como na secagem e torrefação dos materiais.

Devido às características peculiares das biomassas, a operação de leitos fluidizados com estes materiais é bastante diferenciada das aplicações usuais desta tecnologia, já bem desenvolvidas e estabelecidas. Sabe-se, por exemplo, que as partículas de biomassa

apresentam fluidização de baixa qualidade, sendo necessária a adição de um material inerte ao sistema para melhorar sua movimentação no leito. Para que as condições de operação sejam otimizadas e promovam a transformação dos materiais de forma eficiente, a caracterização da biomassa e o estudo de sua fluidodinâmica se tornam relevantes.

O Laboratório de Tecnologia de Partículas e Processos Multifásicos (LaProM/FEQ/UNICAMP) vem ao longo de sua história buscando vencer o desafio da utilização de biomassas por meio de estudos da caracterização física, química, térmica e fluidodinâmica e da viabilidade de uso destes em processos de conversão termoquímica.

2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Objetivo Geral

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo geral caracterizar comportamentos e parâmetros fluidodinâmicos da mistura da palha de milho com inerte (areia) visando sua aplicabilidade em processos físicos e de conversão térmica que empregam a tecnologia do leito fluidizado gasoso.

Objetivos Específicos

- Caracterizar das biomassas com relação ao diâmetro médio, esfericidade e massa específica aparente;
- Determinar parâmetros de fluidização (velocidades e porosidades do leito) pelos métodos da queda de pressão média, desvio padrão das flutuações de pressão e expansão do leito;
- Identificar os comportamentos fluidodinâmicos por meio da inspeção das flutuações de pressão, do espectro de potência e análise de imagem do leito;
- Avaliar de forma crítica a influência da razão de diâmetro e de fração mássica entre biomassa e inerte nos comportamentos e parâmetros fluidodinâmicos;
- Comparar modelos empíricos da literatura às velocidades características e propor novas correlações empíricas para a determinação destas velocidades

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta o embasamento teórico e o desenvolvimento tecnológico que levaram a escolha dos objetivos desta pesquisa. Retrata-se inicialmente uma descrição da biomassa selecionada para estudo e de sua disponibilidade e produção no Brasil. Também é delineado um panorama do uso de leitos fluidizados em diferentes processos envolvendo biomassas.

O conceito de fluidização e sua aplicação no estudo de misturas binárias são descritos por meio da apresentação das principais terminologias e análises dos fenômenos dentro do leito. A revisão é então convergida para estudos da fluidodinâmica das biomassas e da influência de características específicas destes materiais (tamanho e fração mássica) em diferentes parâmetros fluidodinâmicos.

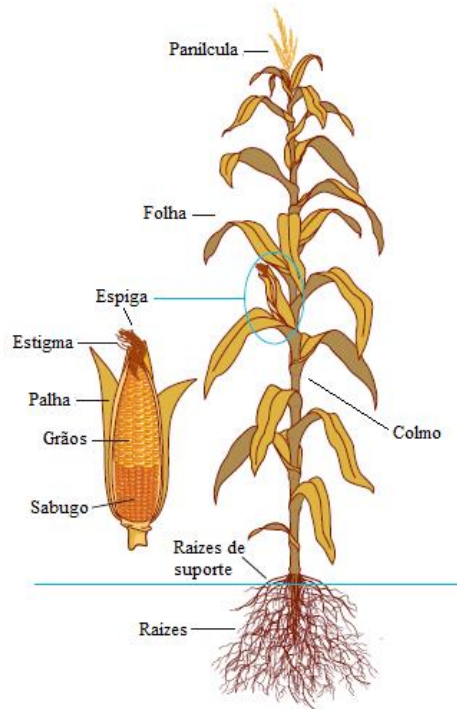
Por fim, é realizada uma breve apresentação do uso de metodologias na identificação dos comportamentos e parâmetros fluidodinâmicos. Também são apresentadas as correlações empíricas da literatura para a determinação destes parâmetros.

3.1. A Biomassa

O milho (*Zea mays L.*) é uma planta gramínea de caráter versátil, pois seu cultivo pode ser realizado em diferentes condições de solo, de zona térmica e de altitude, o que o leva a ser um dos grãos mais consumidos no mundo, principalmente para alimentação humana e animal (EPE, 2014). No primeiro caso, pode ser empregado em sua forma natural, ou após processamento, sendo transformado em amido, xarope de glucose, óleo e diversos outros produtos. No caso da alimentação animal, também pode ser consumido como grão puro ou em uma mistura dos grãos com os resíduos da plantação. Este composto pode ser moído e transformado em silagem, enquanto o próprio grão também pode ser triturado e transformado em ração (EMBRAPA, 1991).

No Brasil, a plantação de milho é a terceira maior lavoura, ficando atrás apenas das culturas de cana-de-açúcar e de soja. A produção do ano de 2017 foi de 99,55 milhões de toneladas. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016) considera que a produção de resíduos da cultura de milho seja de $1,68 \text{ t}_{\text{biomassa}}/\text{t}_{\text{milho}}$ em base seca, mas os resíduos incluídos neste cálculo são o colmo, sabugo, folha e palha (Figura 3.1). Koopmans e Koppejan (1997) indicam, a partir de um levantamento da literatura, que a produção apenas de palha seja de $0,2 \text{ t}_{\text{biomassa}}/\text{t}_{\text{milho}}$. Considerando a produção brasileira de milho de 2017, pode-se calcular uma geração de 19,9 milhões de toneladas do resíduo em estudo neste ano.

Figura 3.1 Representação esquemática das partes da planta do milho



Fonte: *adaptado de* Arora; Licht e Leibold (2014)

O uso do milho na produção de biocombustíveis pode concorrer com suas aplicações na alimentação humana e animal. O comitê mundial de segurança alimentar realizou em 2013 o “Painel de Especialistas de Alto Nível em Segurança Alimentar e Nutrição” (HLPE, 2013), no qual este tema foi amplamente debatido. A comunidade acredita que o aumento no preço do petróleo e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes tornarão alguns biocombustíveis competitivos, mesmo sem políticas públicas que favoreçam este setor.

A produção de biocombustíveis atualmente tem levado a um aumento no preço dos alimentos, o que favorece os produtores, mas ao mesmo tempo gera um impacto negativo nos países importadores e consumidores mais pobres. Os especialistas acreditam que políticas locais devem ser adotadas para avaliar os impactos desta concorrência e garantir um uso eficiente do alimento, da terra e da água.

Acima de tudo, os pesquisadores ressaltam que mais de 1/3 da população depende da energia proveniente de biomassa (principalmente lenha) e o desenvolvimento de fontes mais sustentáveis e limpas pode gerar um grande impacto positivo no que tange ao aumento de empregos e qualidade de vida no campo, além da redução da escravidão e da carga de trabalho de mulheres (HLPE, 2013).

Baseando-se nesta análise, observa-se que a aplicação de resíduos de plantações como fonte de energia poderia minimizar a competição em debate, pois a produção do resíduo é uma consequência do uso do material como alimento. Evidentemente, estudos e avaliações ainda devem ser realizados no sentido de viabilizar esta hipótese, e este trabalho tem por objetivo contribuir para esta avaliação.

3.2. Aplicação de Leitos Fluidizados no Processamento de Biomassas

A tecnologia do leito fluidizado pode ser aplicada em diversas etapas do processamento de biomassas, desde a secagem das partículas, o processo de torrefação, até a conversão do material em biocombustíveis e energia. Este item trará uma breve exemplificação de como a tecnologia é utilizada, começando pela conversão, etapa primordial, seguindo do processo de torrefação e de secagem.

De acordo com Basu (2018), as tecnologias que podem tornar o uso da biomassa viável estão relacionadas a processos de conversão bioquímica (digestão, fermentação e hidrólise ácida e enzimática) e conversão termoquímica (pirólise, combustão e gaseificação). Este trabalho dará ênfase nas tecnologias de conversão termoquímica que aplicam leitos fluidizados.

A pirólise ocorre em temperaturas mais baixas (380-530 °C) e na presença de nitrogênio (N₂), formando compostos sólidos (ex.: biocarvão), líquidos (ex.: bio-óleo) e gasosos (ex.: dióxido de carbono, metano e hidrogênio). A combustão e gaseificação ocorrem a elevadas temperaturas, entre 500 e 1500°C. Entretanto, no primeiro caso, a conversão é realizada com excesso de oxigênio (O₂), levando a formação de CO₂ e H₂O e liberação de energia mediante quebra de moléculas. No segundo caso, o ambiente tem deficiência de O₂, de maneira que são formados CO, H₂ e H₂O. Estes produtos, conhecidos como gás de síntese, são posteriormente transformados em moléculas de maior valor agregado.

Cui e Grace (2007) relataram que a tecnologia de leito fluidizado tem sido amplamente empregada para a realização da conversão termoquímica do material por meio dos processos de combustão, gaseificação e pirólise. As vantagens desta tecnologia estão em proporcionar boa mistura e maior contato entre gás e sólido, promover temperatura uniforme e controlável, garantir excelente troca de calor e possibilitar o uso de materiais com propriedades bastante distintas. Kunii e Levenspiel (1991) também citaram como vantagem desta tecnologia o fato de serem facilmente ajustadas para operações em larga escala.

Além disso, há também estudos de leitos fluidizados aplicados em etapas anteriores à conversão, como no processo de torrefação do material, o qual consiste no aquecimento da biomassa a uma temperatura entre 230 e 300 °C, em ambiente inerte, a fim de alterar a estrutura do material, tornando-a mais homogênea e adequada à conversão termoquímica, ademais de liberar compostos voláteis, aumentando o potencial calorífico do material (BASU, 2018).

Chew e Doshi (2011) relatam a construção de uma planta comercial de torrefação em leito fluidizado borbulhante na Holanda. O gás em alta velocidade, que atravessa o leito, suspende o material do distribuidor poroso e mantém o sistema em um estado fluido, permitindo um intenso contato entre o gás e a biomassa, promovendo a mistura homogênea de partículas e um gradiente de temperatura uniforme. A transformação do material torreficado por esta planta em péletes levou a um aumento de até 70% no poder calorífico em base volumétrica (kJ/m^3) do material. Os péletes puderam ser usados como matéria-prima para um sistema de coqueificação com carvão, aumentando em 10 vezes a percentagem de biomassa utilizada.

Dhungana, Basu e Dutta (2012) testaram diferentes tipos de reatores para a torrefação de cilindros de madeira (64 mm x 25 mm de diâmetro) e analisaram que os leitos fluidizados tem uma performance comparável à de reatores convectivos convencionais, com altos rendimentos mássicos e energéticos. A principal vantagem apontada pelos autores para o uso do leito fluidizado, frente a outras tecnologias, é o rápido aquecimento do material e a obtenção de um produto altamente uniforme. Além disso, os leitos fluidizados foram considerados mais economicamente vantajosos, quando a torrefação é realizada na mesma planta em que será convertido em energia devido à maior eficiência considerando uma mesma quantidade de material.

Brachi et al. (2016) realizaram a torrefação de resíduos de pele de tomate misturados a partículas de areia em um reator de leito fluidizado e de leito fixo, ambos em escala laboratorial. Os autores verificaram que as amostras torreficadas em leito fluidizado resultaram em um material de maior qualidade e homogeneidade, devido à maior taxa de transferência de calor e a minimização da grande variação de temperatura que ocorre em um leito fixo. Esta variação leva à presença de pequenas zonas com maior temperatura, nas quais as partículas podem sofrer uma maior degradação do que em outras áreas.

Outro processo de pré-tratamento da biomassa que utiliza a tecnologia do leito fluidizado em sua aplicação é a secagem. Brammer e Bridgwater (1999) fazem uma revisão

sobre diferentes tipos de equipamentos que podem ser aplicados na secagem de biomassa em uma planta integrada de gaseificação e bioenergia. Os autores analisaram que leitos fluidizados apresentam condições ideais de secagem de partículas pequenas com distribuição de tamanho uniforme devido às altas taxas de transferência de calor e massa e à boa mistura.

Estas características proporcionam uma secagem rápida e eficiente, em equipamentos de menor tamanho daqueles tradicionalmente utilizados, o que também garante um menor custo de instalação. Outra vantagem apontada é a baixa emissão de voláteis condensáveis, devido à temperatura baixa e uniforme desenvolvida dentro do leito. As mesmas considerações também foram verificadas na revisão realizada por Fagernäs et al. (2010) sobre equipamentos de secagem para a produção de combustível sintético (*syngas*) de segunda geração, utilizando biomassas como matéria-prima.

Estudos mais recentes aplicaram diferentes artifícios para melhorar a eficiência de secagem do sistema. Eliaers e De Wilde (2013) compararam o leito fluidizado convencional com um leito fluidizado rotativo na secagem de biomassa de madeira. Os autores observaram uma melhora no processo devido à minimização da diferença de velocidade do gás entre a parede e o centro do leito. Liu et al. (2014) desenvolveram uma placa distribuidora de gás com orifícios inclinados a 30° a fim de melhorar a circulação de sólidos dentro do equipamento e observaram que a secagem de serragem pode ser feita sem a adição de um inerte.

Em ano subsequente, Liu et al. (2015) acoplaram um trocador de calor ao leito fluidizado e reaproveitaram sua corrente de saída de vapor dentro dos tubos do trocador, de forma a criar um autoaquecimento no sistema. O arranjo conseguiu secar a serragem de madeira consumindo apenas 1/20 da energia que seria utilizada sem o acoplamento do trocador de calor. Esta comparação foi feita a partir da simulação de ambos os processos no software PRO/II versão 9.1 (*Invensys Corporation*), considerando uma alimentação de 5000 kg/h de biomassa com umidade inicial de 7,5 m-%. A situação com o autoaquecimento, de acordo com os autores, apresentou um consumo de 540,9 kW, ao passo que a simulação sem o acoplamento demandou 2159,9 kW.

Pela descrição da versatilidade de emprego do leito fluidizado, com diferentes fenômenos fluidodinâmicos podendo ser estabelecidos entre as partículas de biomassa, um aprofundamento sobre a fluidodinâmica destes sistemas é fundamental para a escolha adequada das condições de operação do leito e das características do material a ser transformado.

3.3. Fluidodinâmica de Partículas Homogêneas

Antes de compreender o comportamento fluidodinâmico de misturas de partículas, é necessário entender os princípios que envolvem a dinâmica de fluidização de materiais com o mesmo diâmetro e massa específica, também chamados de homogêneos. Então, este item visa apresentar os princípios que nortearão a avaliação da fluidodinâmica apenas do inerte (areia).

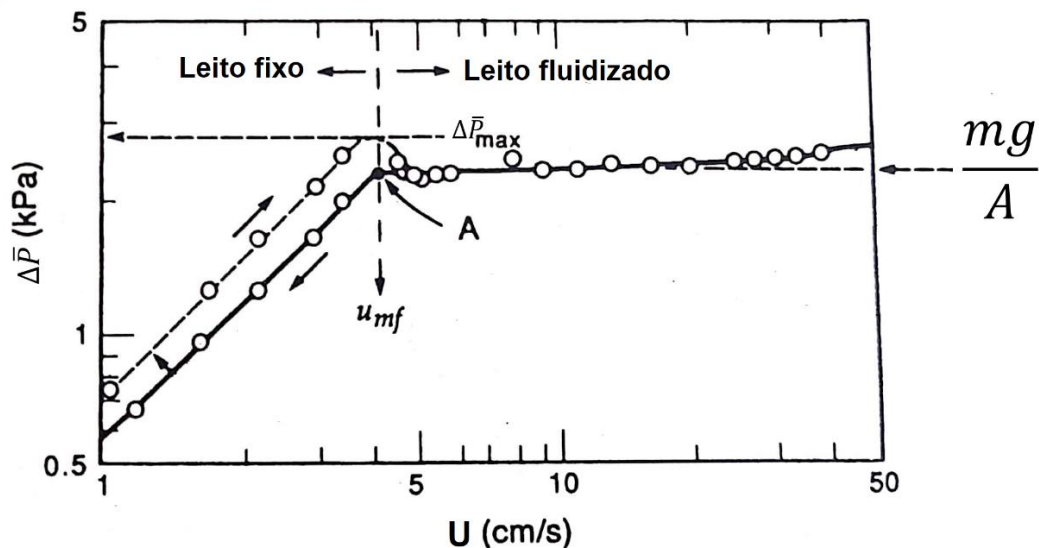
De acordo com Geldart (1986) e Kunii e Levenspiel (1991), quando um leito de partículas homogêneas é percolado por um gás, de forma a estar em estado fixo (sem movimento), a queda de pressão média do leito ($\Delta\bar{P}$) aumenta com o aumento da velocidade superficial do gás (U), de acordo com a Equação de Ergun (1952, *apud* Kunii e Levenspiel 1991):

$$\frac{\Delta\bar{P}}{L_0} = 150 \frac{(1 - \xi_0)^2}{\xi_0^3} \frac{\mu U}{(\varphi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \xi_0)}{\xi_0^3} \frac{\rho U^2}{\varphi d_p} \quad (3.1)$$

em que L_0 e ε_0 são a altura e a porosidade do leito fixo, φ a esfericidade do sólido, d_p o diâmetro médio da partícula e μ a viscosidade do gás, respectivamente.

Na velocidade de gás em que a força de arraste aplicada em uma única partícula excede a força exercida pela gravidade ou a queda de pressão do leito se iguala a massa do leito por unidade de área ($m.g/A$), tem-se como resultado uma queda de pressão constante, como na Figura 3.2, na região após o ponto A.

Figura 3.2 Queda de pressão do leito em função da velocidade superficial do gás para partículas finas homogêneas



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

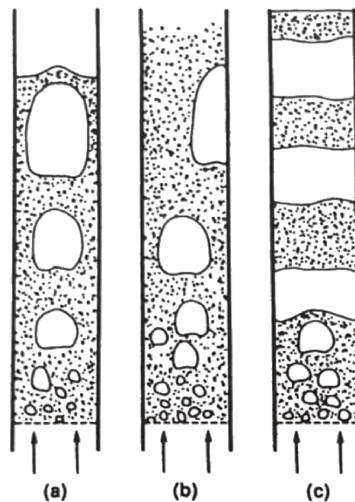
Na situação de um leito compactado com velocidade superficial do gás crescente, uma pressão extra é necessária para o início da movimentação, de forma que a queda de pressão no leito atinge um valor máximo, indicado como $\bar{\Delta P}_{max}$ na Figura 3.2. Com a pressão adicional, o leito apresenta um caráter mais poroso, o que leva a posterior diminuição da queda de pressão até o valor em que a queda de pressão se torna constante.

A velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) é geralmente definida como a interseção da linha horizontal correspondente ao leito fluidizado e a linha correspondente a inclinação da região do leito fixo (ponto A da Figura 3.2).

Partículas com diâmetros médios entre 0,04 mm e 0,5 mm, e massas específicas entre 1400 kg/m³ e 4000 kg/m³, classificadas como do grupo B de Geldart (1973), ou sólidos maiores e mais densos, classificados no grupo D, podem apresentar um borbulhamento característico. Estas bolhas se formam próximas ao distribuidor com pequeno volume e aumentam em tamanho conforme emergem pelo leito. Se o leito é fundo ($H > 2D_c$), as bolhas ocupam uma proporção substancial do leito, passando a serem chamadas de pistões, pois causam um movimento típico de empistonamento na superfície do leito.

Para as partículas mais finas, do grupo B, são formados os chamados pistões simétricos, como os da Figura 3.3a. Para maiores velocidades de gás, estes pistões tendem a aderir à parede, como mostrado na Figura 3.3b. As partículas do grupo D, por sua vez, formam um leito alternado, com fases densas e diluídas separadas por grandes bolsões de gás, que atingem o diâmetro da coluna, através dos quais as partículas caem em formato de “chuva”, conforme representado pela Figura 3.3c (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Figura 3.3 Diferentes formatos de pistão: (a) pistão simétrico, (b) pistão de parede e (c) pistão completo.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991)

3.3.1. Identificação de Regimes Fluidodinâmicos de Partículas Homogêneas

A identificação dos regimes fluidodinâmicos em leitos fluidizados em função da velocidade superficial do gás é uma tarefa complexa devido ao arranjo das partículas sólidas e formação dos diferentes tipos de bolhas de gás. Para partículas homogêneas, o método mais aplicado para a identificação de regimes é a inspeção das flutuações de pressão (LEE e KIM, 1988; BI e GRACE, 1995; JOHNSON et al., 2000; VAN OMMEN et al., 2010; ZHANG et al., 2011; JAIBOON et al., 2013; HE et al., 2014 e TANNOUS e LOURENÇO, 2015). Entretanto, outros métodos foram desenvolvidos por diferentes cientistas para tornar a identificação mais clara e menos subjetiva (LIRAG e LITTMAN, 1971; CANADA et al., 1978; JOHNSON et al., 2000; FELIPE, 2004; VAN OMMEN et al., 2010; JAIBOON et al., 2013). Dentre estes métodos, destacam-se os espectros de densidade de potência no domínio da frequência.

Este item da dissertação visa compilar informações da literatura a respeito destes dois métodos que auxiliarão na interpretação das curvas de inspeção das flutuações de pressão e espectro de potência da mistura de palha de milho e areia. A revisão foi feita considerando ensaios com partículas homogêneas, pois até abril de 2019, não foram encontrados trabalhos que avaliassem o espectro de potência dos estados fluidodinâmicos de misturas binárias de biomassa e material inerte.

Lirag e Littman (1971) avaliaram as flutuações de pressão de diferentes partículas homogêneas a fim de identificar o componente periódico e apontar suas possíveis causas. Os materiais utilizados foram esferas de vidro ($0,218 \text{ mm} \leq d_p \leq 0,500 \text{ mm}$; $2420 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_p \leq 2480 \text{ kg/m}^3$) e esferas de cobre ($d_p = 0,132 \text{ mm}$ e $\rho_p = 7720 \text{ kg/m}^3$). As flutuações de pressão foram medidas no *plenum* e em diferentes alturas do leito, não definidas pelos autores. As flutuações de pressão foram associadas a eclosão de bolhas na superfície do leito. Além disso, o padrão de flutuações apresentou um espaçamento regular e uma periodicidade, a qual também foi comprovada pelo espectro de potência, que apresentou um pico estreito (largura menor que 1 Hz). Os autores avaliaram que a frequência das flutuações diminuiu com o aumento da altura do leito e do tamanho das partículas. A amplitude das flutuações, por sua vez, aumentou com a altura do leito, com o tamanho e a massa específica das partículas e com a velocidade do gás (razão U/U_{mf}).

Canada et al. (1978) utilizaram as flutuações de pressão para identificar os regimes de borbulhamento, empistonamento aparente, empistonamento e turbulento. Os materiais utilizados na análise foram esferas de vidro comum ($d_p = 0,65 \text{ mm}$ e

$\rho_p = 2480 \text{ kg/m}^3$) e esferas de vidro ($d_p = 2,60 \text{ mm}$ e $\rho_p = 2920 \text{ kg/m}^3$). O borbulhamento foi identificado quando pequenas bolhas individuais passavam pelo leito, entretanto, os autores não comentam sobre como eram as flutuações observadas. No empistonamento aparente, as flutuações tiveram frequência e amplitude bem definidas e um padrão oscilatório. A amplitude aumentou com o aumento da velocidade no regime de empistonamento, até um máximo, para depois diminuir quando o leito se tornou turbulento. Os autores associaram o componente oscilatório das flutuações com a aceleração e desaceleração do leito que ocorre quando o movimento em pistão foi observado.

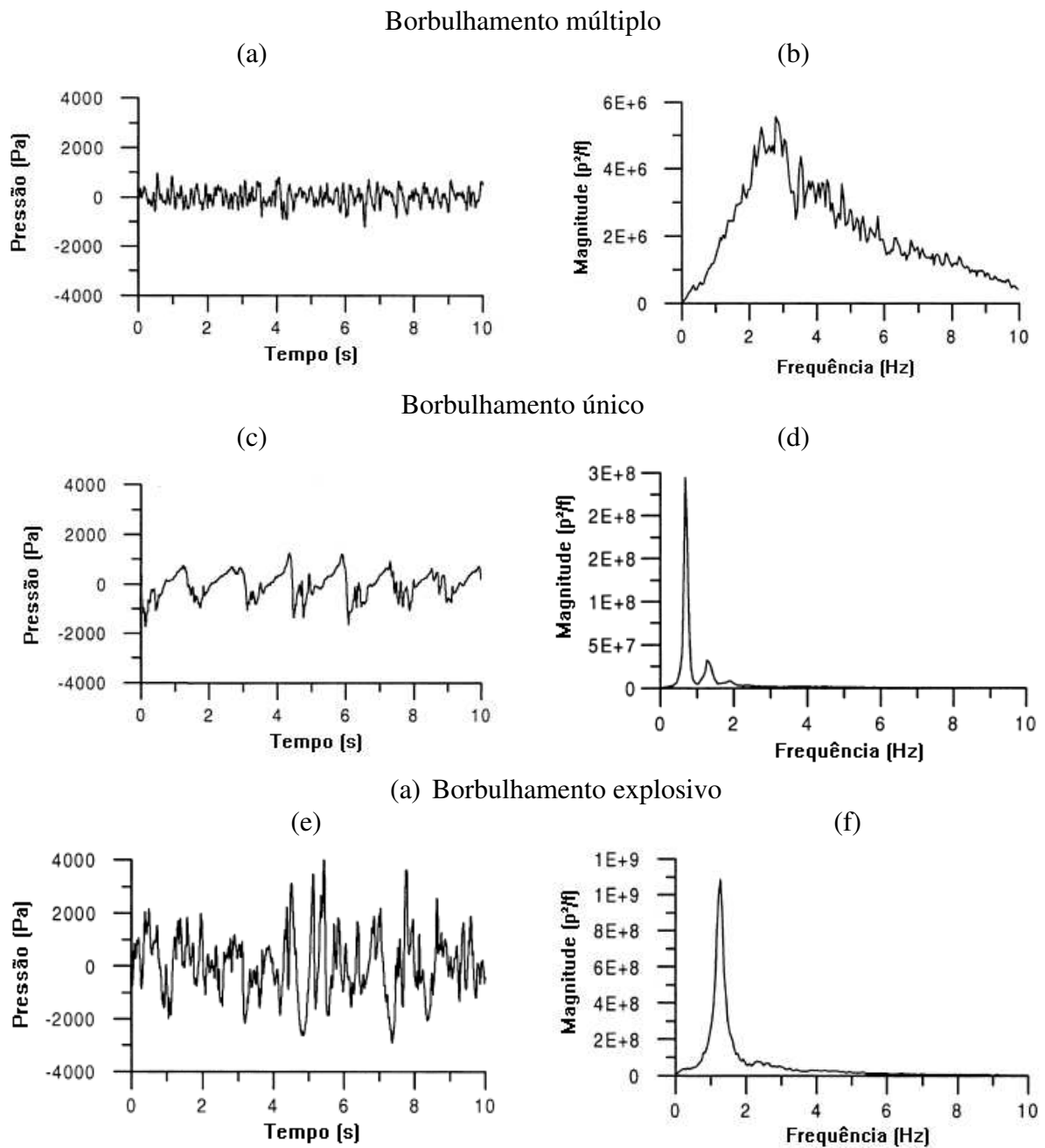
Johnsson et al. (2000) compararam diferentes análises das flutuações de pressão no domínio do tempo, da frequência e do espaço de estados (*state-space analysis*, como a entropia de Kolmogorov). As análises foram utilizadas para identificar quatro regimes dentro do leito, dentre eles: borbulhamento múltiplo, borbulhamento único e borbulhamento explosivo. No domínio do tempo, foram avaliadas a inspeção das flutuações de pressão (sem nenhum tratamento matemático), o desvio padrão, a assimetria e a curtose, ou seja, o grau de achatamento considerando que as flutuações obedecem a distribuição normal de probabilidade. No domínio da frequência, considerou-se o espectro de potência obtido pela Transformada Rápida de Fourier. O domínio do espaço de estados não será abordado nesta dissertação por aplicar ferramentas mais avançadas de cálculo, que fogem do escopo deste estudo. O material utilizado foi areia ($d_p = 0,31 \text{ mm}$ e $\rho_p = 2600 \text{ kg/m}^3$).

Com relação às análises no domínio do tempo, os autores verificaram que o borbulhamento múltiplo (Figura 3.4a) apresenta menor amplitude do que o borbulhamento único (Figura 3.4c). Além disso, este último regime tem um sinal periódico das flutuações não verificado no caso anterior. O borbulhamento explosivo (Figura 3.4e) tem maior amplitude que os demais e sinais de flutuações de pressão irregulares com menor e maior amplitudes intermitentes.

Com relação ao domínio da frequência, os autores observaram diferenças entre os regimes avaliados. Enquanto o borbulhamento múltiplo apresentou uma ampla banda de frequências, entre 0 a 10 Hz (Figura 3.4b), o borbulhamento único tem uma faixa de frequências estreita (0 a 2 Hz), com uma frequência dominante de 0,7 Hz, indicada pelo pico de grande amplitude (Figura 3.4d). O borbulhamento explosivo, por sua vez, tem uma faixa de frequências intermediária (0 a 6 Hz) e uma frequência dominante de 1,3 Hz (Figura 3.4f).

Algumas conclusões relevantes foram firmadas a partir deste trabalho. Em primeiro lugar, observou-se que a análise do domínio da frequência é muito importante para validar a presença dos diferentes regimes identificados, porque apresentou diferenças visíveis. Em segundo lugar, analisou-se que as principais frequências observadas no leito estão entre a faixa de 0 e 10 Hz, sendo irrelevante uma análise de valores maiores que estes.

Figura 3.4 Flutuações de pressão e espectros de potência obtidos por Johnsson et al. (2000)



Fonte: Adaptado de Johnsson et al. (2000)

A importância da análise do espectro de potência para identificação de regimes foi também confirmada pelo trabalho de Felipe (2004), cujo objetivo foi utilizar esta análise para o monitoramento online dos regimes de fluidização. O autor avaliou o comportamento fluidodinâmico de diversos materiais (areia, celulose microcristalina, alumina, catalisador FCC usado e regenerado) de forma a poder comparar os espectros obtidos por diferentes grupos de partículas da classificação de Geldart. Um mesmo regime foi verificado apresentando espectros semelhantes independentemente do tipo de material utilizado. Além disso, os espectros de potência apresentaram diferenças mais evidentes entre um regime e outro do que as curvas de inspeção das flutuações de pressão (sem tratamento estatístico).

No caso das partículas do tipo B, mesmo grupo da maioria das partículas de areia e palha de milho deste trabalho, o autor observou três regimes: borbulhamento múltiplo, empistonamento e borbulhamento explosivo, exemplificados na Figura 3.5 por meio dos sinais obtidos para a celulose microcristalina ($d_p = 0,329$ mm e $\rho_p = 980$ kg/m³).

No regime de borbulhamento múltiplo (Figura 3.5a), o espectro apresenta uma banda de frequência mais larga e sem um valor dominante, devido à diversidade de tamanho e velocidade das bolhas. O empistonamento (Figura 3.5b) apresenta um espectro relativamente similar ao borbulhamento único apresentado por Johnsson et al. (2000), em que se observa um espectro mais estreito, com a presença de uma frequência dominante em 2,5 Hz. Ao passo que o borbulhamento explosivo (Figura 3.5c), em ambos os casos, apresenta um alargamento da banda de frequência e uma frequência dominante em 2,2 Hz.

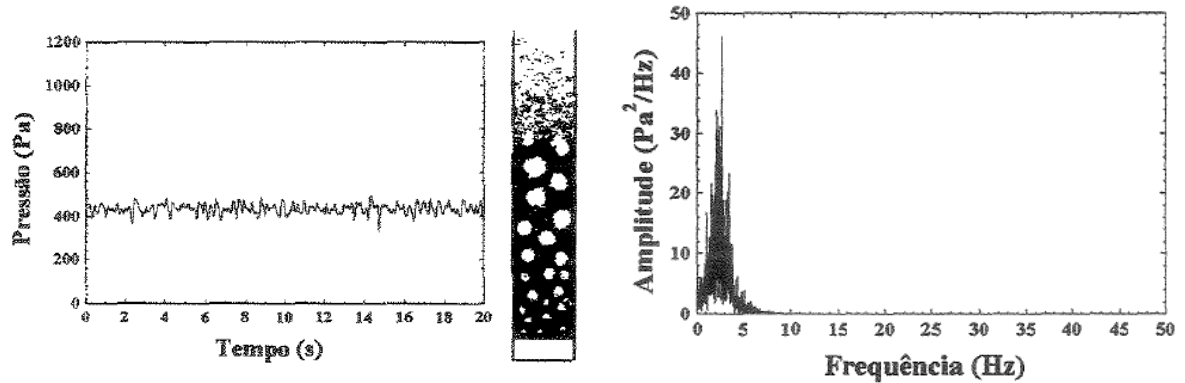
Outra comparação que pode ser feita entre os trabalhos de Johnsson et al. (2000) e Felipe (2004) é a observação de que as frequências das flutuações do leito estão na faixa de 0 a 10 Hz, sendo que para valores maiores nada foi verificado. Espectros semelhantes para os regimes de borbulhamento e empistonamento também foram encontrados por Jaiboon et al. (2013) ao estudarem partículas de carbonato de potássio impregnadas com γ -alumina ($d_p = 0,15$ mm e $\rho_p = 3900$ kg/m³).

Pode-se concluir que a análise dos espectros de potência associados as flutuações de pressão do leito são uma ferramenta importante para identificar os diferentes regimes do leito, por apresentarem diferenças mais evidentes e menos subjetivas. Nesta dissertação, estas análises serão aplicadas na identificação dos comportamentos observados durante a fluidodinâmica da mistura de palha de milho e areia, os quais apresentam algumas propriedades próximas aos observados pelos diferentes autores aqui descritos, mas também

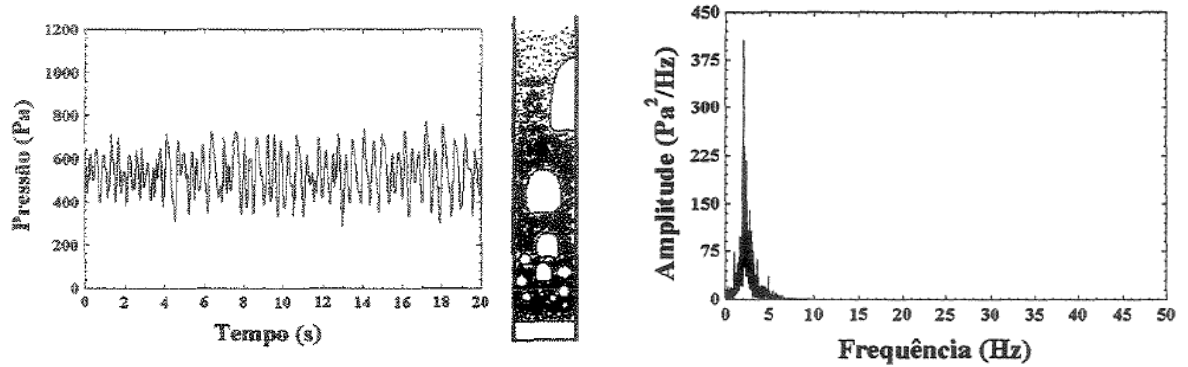
propriedades divergentes, devido à complexidade da combinação de dois materiais com características diversas.

Figura 3.5 Flutuações de pressão e espectros de potência de diferentes estados obtidos por Felipe (2004) (CMC: $d_p = 0,329$ mm, $\rho_p = 980$ kg/m³)

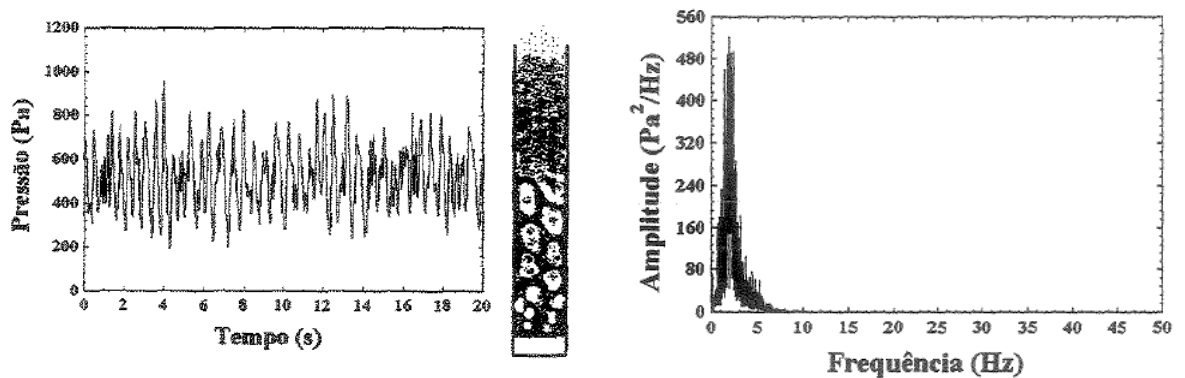
(a) Borbulhamento múltiplo ($U = 0,3$ m/s)



(b) Empistonamento ($U = 0,39$ m/s)



(c) Fluidização explosiva ($U = 0,42$ m/s)



Fonte: Adaptado de Felipe (2004)

3.4. Fluidodinâmica de Misturas Binárias

Fluidização é um processo pelo qual partículas sólidas são suspensas por meio da ação de um gás ou líquido a fim de que adquiram um caráter fluido. Esse aspecto fluido permite que as partículas sejam tratadas como um meio contínuo, no qual a diferença de pressão em quaisquer dois pontos é aproximada à pressão estática do sistema. A fluidização promove um contato íntimo entre partícula e fluido, torna possível a movimentação do material em leitos móveis e outros equipamentos, além de permitir o transporte dos sólidos por meio de fluxos em tubulações.

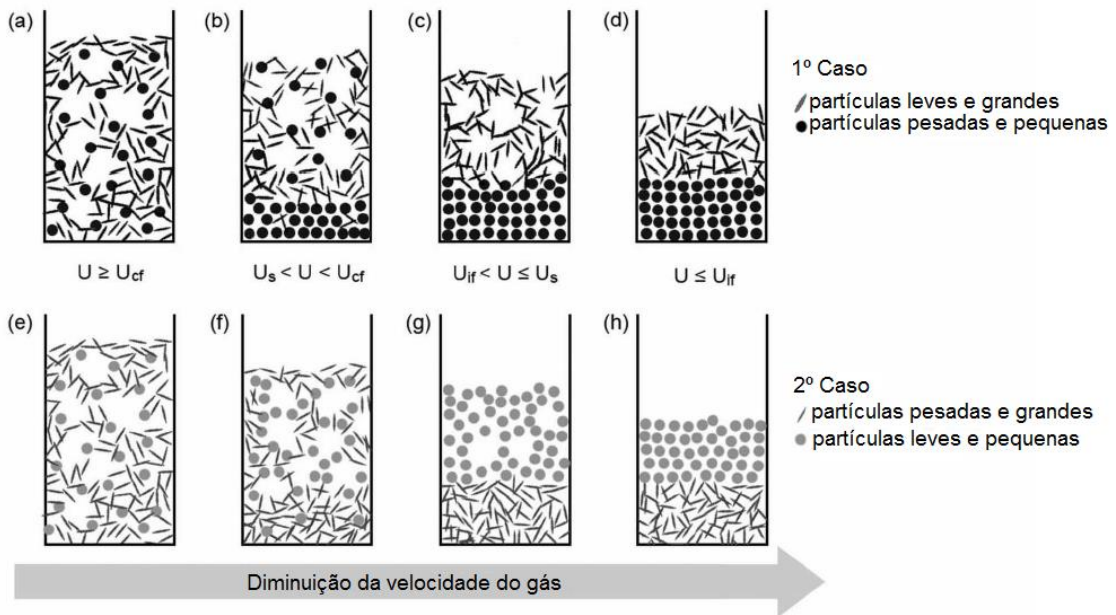
Em um sistema gás-sólido, leitos com grandes quantidades de partículas de tamanho uniforme apresentam baixa qualidade na fluidização devido à formação aglomerados, escoamento empistonado e canais preferenciais. A qualidade de fluidização geralmente é melhorada pela adição de partículas de tamanhos diferentes, podendo formar o sistema sólido binário ou polidisperso, dependendo da distribuição granulométrica do material (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Rowe, Nienow e Agbim (1972) definem uma nomenclatura amplamente usada no estudo de mistura e segregação de misturas binárias de partículas em leitos fluidizados. Inicialmente, leva-se em consideração que em uma mistura binária cada material terá um valor diferente da velocidade de mínima fluidização (U_{mf}), ou seja, da velocidade de gás necessária para suspender todas as partículas do sistema. A espécie que fluidiza a uma velocidade menor é chamada de componente fluido e sua velocidade de fluidização é U_F , a espécie que fluidiza em uma velocidade de gás maior é identificada como componente empacotado e sua velocidade de mínima fluidização denominada U_P .

Com relação à diferença de massa específica, os autores diferenciam as partículas entre aquelas mais densas, que tendem a afundar, as quais são chamadas imergíveis (*jetsam*), e as menos densas, com tendência a flutuar, que são identificadas como emergíveis (*flotsam*). Quando não há diferença entre as massas específicas, o material de maior tamanho é denominado imergível, e o de menor tamanho, emergível. Com relação ao tamanho, as partículas também são classificadas como grandes ou pequenas.

Tannous e Lourenço (2015) avaliaram os diferentes arranjos de materiais dentro do leito com a diminuição da velocidade do gás. Dois casos foram observados: partículas leves e grandes misturadas com partículas pesadas e pequenas; e partículas pesadas e grandes com partículas leves e pequenas, de forma que diferentes comportamentos foram identificados, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 Arranjo de misturas de partículas binárias (inerte e biomassa) em um leito fluidizado gasoso com a diminuição da velocidade do gás



Fonte: adaptado de Tannous e Lourenço (2015)

O estudo foi iniciado com um leito completamente misturado a uma velocidade elevada de gás, conforme podemos verificar na Figura 3.6a e 3.6e. As Figuras 3.6b e 3.6f indicam que com a diminuição da velocidade começa a haver uma segregação de materiais, sendo que os mais pesados migram para o fundo do leito, enquanto os mais leves permanecem fluidizados, independentemente do tamanho das partículas.

A segregação é ainda maior conforme a velocidade de gás é diminuída, levando as situações mostradas nas Figuras 3.6c e 3.6g, nas quais se observa uma separação efetiva dos dois materiais, em que as partículas mais leves se movimentam na parte superior do leito, ao mesmo tempo que as mais pesadas permanecem fixas na parte inferior do mesmo. Por fim, a velocidades de gás relativamente baixas, o leito permanece fixo (Figuras 3.6d e 3.6h), com os materiais completamente separados.

Espera-se que as misturas binárias estudadas neste trabalho apresentem um fenômeno de mistura e segregação similar ao observado pelas autoras acima citadas. Os diferentes arranjos dentro do leito serão avaliados com a variação da velocidade para que seja possível conhecer de forma adequada o comportamento dos materiais dentro do equipamento.

3.4.1. Identificação de Velocidades e Comportamentos Característicos de Misturas Binárias

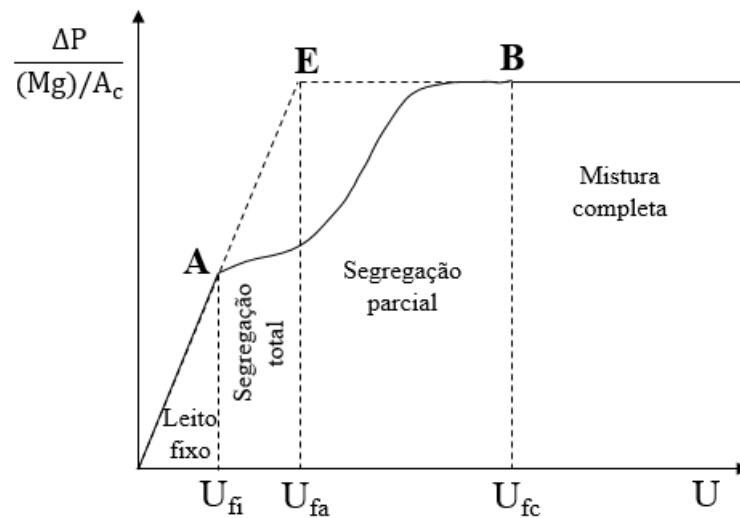
Além da identificação dos diferentes arranjos e comportamentos desenvolvidos dentro de um leito durante a fluidização da mistura de partículas, outro aspecto importante a ser estudado é a determinação de velocidades características destes comportamentos, que permitem a estimativa de qual deve ser a vazão de gás adequada para que o sistema gás-sólido seja mantido conforme o arranjo desejado.

Mourad, Hemati e Languerie (1994) trabalharam com a mistura binária de grãos de milho (d_p entre 6,3 e 8,0 mm; $\rho_p = 1200 \text{ kg/m}^3$) e areia (d_p entre 0,250 e 0,315 mm; $\rho_p = 2650 \text{ kg/m}^3$) em diferentes razões mássicas entre o milho e a areia (de 0,075 a 0,750). Apesar de não trabalharem com uma combinação de biomassa e inerte, este trabalho é importante para a área porque os autores conseguem definir de forma clara os quatro comportamentos de fluidização que geralmente são observados neste tipo de mistura, como em Tannous, Olivares-Gómez e Sauvanel (2008) e Tannous e Lourenço (2015).

Os autores identificaram três velocidades características na curva da evolução da queda de pressão em função da velocidade do leito: a de fluidização inicial (U_{fi}), de fluidização aparente (U_{fa}) e a de fluidização completa (U_{fc}). Os dados foram obtidos a partir da defluidização progressiva do leito. A U_{fi} foi identificada no limite máximo da porção linear correspondente ao leito fixo (Figura 3.7 – ponto A). A U_{fc} foi demarcada no limite mínimo da porção linear correspondente ao estado completamente fluidizado (Figura 3.7 – ponto B). U_{fa} , por sua vez, foi determinada na interseção das linhas projetadas a partir das duas porções lineares acima mencionadas (Figura 3.7 – ponto E).

A partir destas três velocidades, os estudos com frações maiores de grãos de milho (acima de 0,144) permitiram a definição de quatro comportamentos de fluidização: leito fixo ($U \leq U_{fi}$), segregação total ($U_{fi} \leq U \leq U_{fa}$), segregação parcial ($U_{fa} \leq U \leq U_{fc}$) e mistura completa ($U \geq U_{fc}$), como pode ser visto na Figura 3.7.

Figura 3.7 Esquema para a identificação de velocidades e comportamentos fluidodinâmicos para misturas de milho e areia



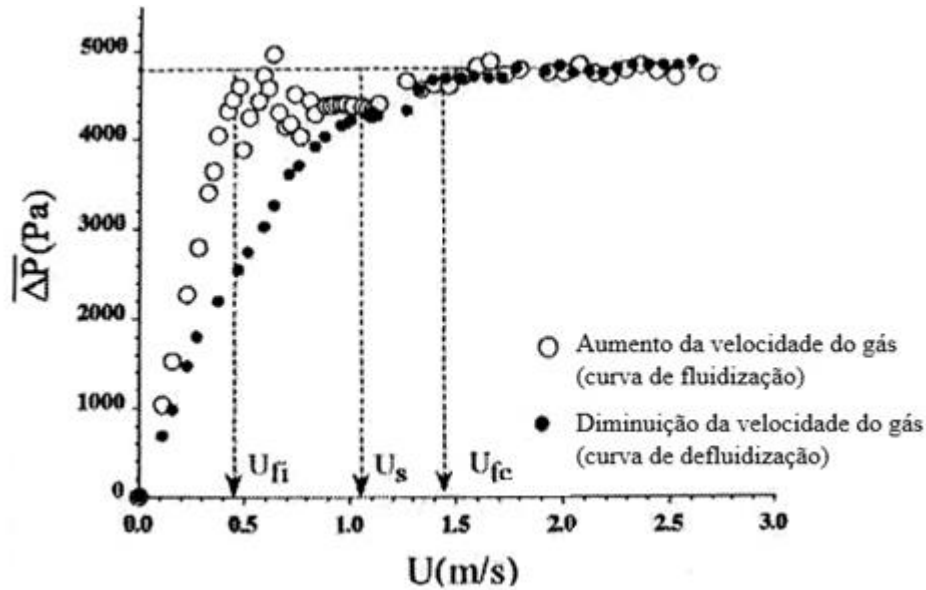
Fonte: *adaptado de* Mourad, Hemati e Laguerie (1994)

Tannous, Hemati e Laguerie (1998) em seu trabalho com um leito de partículas inertes polidispersas correspondentes aos grupos B e D da classificação de Geldart definem a velocidade de segregação (U_s) a partir da ocorrência de uma zona totalmente defluidizada no fundo do leito, constituída pelas partículas de maior tamanho. Mesmo não sendo avaliada a mistura binária de biomassas e inertes, esta definição foi aplicada posteriormente em sistemas deste tipo, como em Oliveira e Tannous (2009) e em Tannous e Lourenço (2015).

O estudo foi feito a partir do aumento (fluidização) e diminuição (defluidização) da velocidade do gás com um leito de partículas bem misturadas. A velocidade de fluidização completa (U_{fc}) continua a ser definida como aquela em que todas as partículas estão suspensas pelo fluido. Entre U_{fc} e U_s foi observada uma diminuição na queda de pressão em ambas as situações. Entre U_s e U_{fi} diferentes comportamentos foram observados (Figura 3.8): quando o leito é fluidizado, a queda de pressão apresenta uma grande oscilação devido ao deslocamento das partículas menores para a superfície e a resistência criada pelas de maior tamanho. Na defluidização verifica-se nesta região apenas uma diminuição mais acentuada e regular da queda de pressão. Abaixo de U_{fi} a oscilação desaparece e ambas as formas de ensaio apresentam o comportamento linear esperado.

As definições de U_{fi} , U_{fa} e U_{fc} de Mourad et al. (1994) e a de U_s de Tannous et al. (1998), considerando a curva de defluidização, foram aplicadas nas curvas de queda de pressão em função da velocidade do gás obtidas neste trabalho, a fim de se identificar as velocidades características das misturas de biomassa e inerte.

Figura 3.8 Diferenças observadas na curva da queda de pressão para a fluidização e defluidização de um sistema de partículas polidisperso



Fonte: adaptado de Tannous, Hemati e Laguerie (1998)

3.5. Estudos de Fluidização de Misturas Binárias com Biomassas

Apesar de todas as vantagens citadas e de inúmeros autores se dedicarem ao desenvolvimento de novas tecnologias para a realização do pré-tratamento dos materiais e da conversão termoquímica de biomassas, poucos pesquisadores procuram entender o comportamento destes materiais em leitos fluidizados e de sua mistura com materiais inertes visando melhorar sua fluidodinâmica (TANNOUS e LOURENÇO, 2015).

O dimensionamento de equipamentos industriais ainda considera análises e correlações desenvolvidas para partículas homogêneas e esféricas (GELDART, 1973; KUNII e LEVENSPIEL, 1991), ou com misturas de partículas inertes, que apresentam diferenças de tamanho e/ou massa específica (ROWE e NIENOW, 1976; CHIBA et al., 1979; THONGLIMP et al., 1984b; FORMISANI, 1991; MOURAD et al., 1994; FORMISANI et al., 2007).

Muitos estudos indicam que as biomassas apresentam uma fluidização ruim ou simplesmente não fluidizam (BILBAO et al., 1987; RASUL, 1998; ZHONG et al., 2008; TANNOUS e LOURENÇO, 2015), de forma que sua aplicação em leitos fluidizados geralmente leva em consideração a adição de um material inerte, o qual também possui suas próprias características em termos de tamanho, massa específica e formato. Logo, o projeto de equipamentos utilizando a literatura associada a materiais homogêneos, inertes e de formato

regular (geralmente esférico) pode ocasionar em processos ineficientes, mal dimensionados e inadequados para o processamento dos resíduos.

Torna-se assim bastante relevante a avaliação dos diferentes comportamentos fluidodinâmicos que podem ser desenvolvidos dentro do leito, a identificação de seus respectivos parâmetros fluidodinâmicos, bem como a comparação entre os diferentes diâmetros e frações de biomassa e de inerte. A identificação destas características permite determinar de forma mais precisa e otimizada como deve ser o projeto e dimensionamento de um equipamento baseado na tecnologia do leito fluidizado borbulhante.

Estudos sobre a identificação de comportamentos fluidodinâmicos e de velocidades características de fluidização das misturas de biomassas com inertes podem ser encontrados na literatura desde a década de 80 (BILBAO et al., 1987). Lourenço (2012) apresenta uma ampla revisão da literatura com relação a estas pesquisas. A Tabela 3.1 traz um resumo dos principais estudos realizados nos últimos cinco anos (2013-2018). Verifica-se uma diversa gama de biomassas analisadas, as quais em geral foram escolhidas de acordo com a disponibilidade do material no local em que a pesquisa é realizada.

A maioria dos pesquisadores avaliou as velocidades características a partir da variação do tamanho das partículas, seja da biomassa ou do inerte, ou a partir da mudança da razão de fração mássica ou volumétrica de biomassa. Por meio dos resultados foram também propostas correlações empíricas, a fim de permitir o cálculo das velocidades utilizando-se outros tamanhos e frações de material.

Não foram encontrados dados referentes ao estudo fluidodinâmico da palha de milho e nem da mistura deste material com a areia, o que torna o estudo proposto neste projeto relevante para que estes dados sejam obtidos e a mistura dos materiais mais bem compreendida. A seguir é feito resumo das observações realizadas pelos autores com relação aos dois parâmetros citados acima (tamanho e fração mássica).

Tabela 3.1 Estudos fluidodinâmicos da mistura biomassa e inerte disponíveis nos últimos cinco anos de literatura

Referência	Biomassa	$\bar{d}_{p,b}$ (mm)	Fração mássica de biomassa (m-%)	Inerte	$\bar{d}_{p,i}$ (mm)
Karmakar et al. (2013)	Casca de arroz	1,100	2; 5; 10;15	Areia	0,230; 0,300
	Bagaço de cana-de-açúcar	1,250			
	Serragem	0,530			
Oliveira et al. (2013)	Bagaço de sorgo	0,125-0,355; 0,355-0,500; 0,500-0,850	5; 10; 15	Areia	0,212-0,355
	Casca de soja	0,150-0,425; 0,425-710; 0,710-0,850			
	Resíduo de tabaco	0,125-0,355; 0,355-0,500 0,500-0,850			
Paudel e Feng (2013)	Sabugo de milho	1,040	10; 20; 30; 40; 50; 60; 70;80;90; 100	Areia	0,241
	Casca de noz	0,100; 0,856		Esferas de vidro	0,383
				Alumina	0,490
Kumoro et al. (2014)	Casca de arroz	1,560	5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 70 ;80 ;90; 100	Areia	0,241; 0,350
	Sabugo de milho	1,040			
Pécora et al. (2014)	Bagaço de cana-de-açúcar	0,242	5	Areia	0,293
	Caroço do tucumã	0,256			
	Casca de arroz	1,590			
	Casca de café	0,570			
	Serragem de pinus	0,529			
Cluet et al. (2015)	Madeira faia	8 (diam.) x 25 (cilindro); 5,5 x 4 x 57 (chip)	7,7; 8,7; 9,9 (vol.)	Olivina	0,237; 0,378
	Madeira balsa	5,5 x 4 x 57 (chip); 2 x 4 x 29,5 (chip)			
Tannous e Lourenço (2015)	Madeira eucalipto	0,508; 0,986; 1,993	5; 10; 15; 20	Areia	0,331
	Endocarpo do tucumã	0,502; 1,017; 2,017			
Pérez et al. (2017)	Bagaço de cana-de-açúcar	0,075;	2; 5; 9	Areia	0,225
		0,225	2; 5; 10; 15		
		0,445	2;5;8;10;12		
		0,722	2; 5		
		0,885	2; 5; 6; 7; 8		
		1,770	2; 5		
		3,555	2; 5		
		7,125	2		
9,500	2				
Wu et al. (2017)	Casca de arroz	0,520	10; 20; 30; 40; 50; 60; 70;80;90; 100	Areia	0,230; 0,370; 0,520
	Casca de noz	0,520			

3.5.1. *Influência do Diâmetro das Partículas*

Kumoro et al. (2014) avaliaram o efeito do diâmetro do inerte (areia, $\bar{d}_{p,i} = 0,241\text{ mm}$ e $0,350\text{ mm}$) em misturas com casca de arroz ($\bar{d}_{p,b} = 1,560\text{ mm}$) e sabugo de milho ($\bar{d}_{p,b} = 1,040\text{ mm}$) na velocidade de fluidização aparente (U_{fa}). Menores valores desta velocidade foram obtidos para o menor tamanho de areia, portanto este foi considerado mais adequado para a fluidização destas biomassas

Tannous e Lourenço (2015) estudaram a influência de três diâmetros diferentes de madeira eucalipto ($\bar{d}_{p,b} = 0,508\text{ mm}$, $0,986\text{ mm}$ e $1,993\text{ mm}$) e endocarpo do fruto de tucumã ($\bar{d}_{p,b} = 0,502\text{ mm}$, $1,017\text{ mm}$ e $2,017\text{ mm}$) em misturas com areia ($\bar{d}_{p,i} = 0,331\text{ mm}$) nas velocidades de fluidização inicial (U_{fi}), aparente (U_{fa}), de segregação (U_s) e completa (U_{fc}). Para a primeira biomassa, foi observado que U_{fi} permanece praticamente constante, entretanto U_{fa} , U_s e U_{fc} aumentam com o aumento do tamanho das partículas. Para a segunda biomassa, verificou-se que U_{fi} e U_{fa} são praticamente constantes, enquanto U_s e U_{fc} aumentam com o aumento do diâmetro.

Pérez et al. (2017) analisaram o arranjo de nove diferentes diâmetros de bagaço de cana-de-açúcar ($0,075\text{ mm} < \bar{d}_{p,b} < 9,500\text{ mm}$) com areia ($\bar{d}_{p,i} = 0,225\text{ mm}$). Para biomassas com menor granulometria do que a areia, U_{fa} permaneceu praticamente constante, entretanto, para tamanhos maiores, U_{fa} aumentou com o aumento do diâmetro.

3.5.2. *Influência da Razão de Fração Mássica de Biomassa*

Paudel e Feng (2013) estudaram a mistura de sabugo de milho e casca de noz com areia, variando a fração mássica de biomassa entre 10 e 100 m-%. Os autores verificaram um aumento na velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) com o aumento a fração mássica de biomassa. O mesmo resultado foi observado por Oliveira et al. (2013) considerando a mistura de diferentes biomassas (bagaço de sorgo, resíduo de tabaco e casca de soja) com areia e variando a fração mássica daqueles materiais entre 5 e 15 m-%.

Karmakar et al. (2013) também observaram um aumento da U_{fa} com o aumento da fração mássica (2-15 m-%) ao estudarem a mistura de casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e serragem com dois tamanhos diferentes de areia. Todavia, Pérez et al. (2017) apenas concordam com esta observação quando o diâmetro de partícula do bagaço de cana-de-açúcar é maior que o do inerte, ao passo que para tamanhos menores, U_{fa} diminui com o aumento da fração mássica.

Tannous e Lourenço (2015) estudaram as diferentes velocidades características (U_{fi} , U_{fa} , U_s e U_{fc}) para as misturas de eucalipto e endocarpo de tucumã com areia variando a razão de fração mássica de biomassa e inerte entre 5 e 20 m-%. Com relação a mistura eucalipto e areia, as autoras analisaram que todas as velocidades aumentaram com o aumento da razão de fração mássica. É importante notar que, para os maiores tamanhos ($\bar{d}_{p,b} = 0,986$ mm e 1,993 mm) e razão de fração mássica de biomassa e inerte (15-20 m-%) observou-se leitos mais expandidos e formação de pistões, o que promoveu um aumento das velocidades. Além disso, nestes casos, U_{fi} e U_{fa} permaneceram praticamente constantes.

Considerando a mistura endocarpo de tucumã/areia, U_{fi} e U_{fa} são praticamente constantes para todas as razões avaliadas, sendo que para o menor tamanho ($\bar{d}_{p,b} = 0,502$ mm) estas velocidades são menores que a velocidade de mínima fluidização da areia. As velocidades U_s e U_{fc} aumentam com o aumento da razão de fração mássica, promovendo uma ampla região de segregação, na qual há uma alta concentração de biomassa no topo do leito.

3.6. Metodologias para o Estudo Fluidodinâmico

A maioria das pesquisas leva em consideração a metodologia da queda de pressão média na identificação das velocidades características. Este, de fato, é o método mais tradicional e conhecido pela literatura, mas outras formas de avaliação foram desenvolvidas ao longo dos anos.

No caso dos estudos da Tabela 3.1, todos os autores aplicaram a metodologia da queda de pressão total (também chamada de curva de fluidização clássica) na determinação das velocidades características, salvo Tannous e Lourenço (2015) que também avaliaram o desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade do gás. As autoras observaram que as velocidades de fluidização inicial, aparente, de segregação e completa obtidas pelos dois métodos apresentaram boa concordância, com desvios padrão menores que 0,05.

Neste trabalho a metodologia da queda de pressão total será comparada às metodologias de desvio padrão das flutuações de pressão e expansão do leito, a fim de se obter parâmetros fluidodinâmicos mais precisos. Apesar das metodologias levarem em consideração diferentes relações estatísticas, no caso da queda de pressão total e do desvio padrão, e diferentes parâmetros do leito, no caso do método da expansão, é esperado que

todas apresentem resultados próximos, pois suas formas gráficas refletem os mesmos fenômenos fluidodinâmicos.

3.7. Correlações Empíricas da Literatura para Parâmetros Fluidodinâmicos de Misturas de Partículas Sólidas

Muitos autores propuseram modelos empíricos que descrevem a variação dos parâmetros fluidodinâmicos (velocidades e porosidades do leito) com relação à fração mássica entre os componentes e às propriedades das partículas como diâmetro médio, massa específica e esfericidade. Estes modelos são úteis para simulações fenomenológicas mais complexas, como em estudos de modelagem de leito fluidizado aplicando ferramentas computacionais.

A seguir, serão apresentados alguns modelos empíricos da literatura selecionados para a avaliação dos parâmetros fluidodinâmicos e para o embasamento da proposta de novos modelos.

3.7.1. Velocidade de Fluidização Aparente

A Tabela 3.2 traz as correlações associadas a identificação da velocidade de fluidização aparente, ou velocidade mínima de fluidização de mistura. Também são descritas as faixas de valores em que as características das partículas foram avaliadas, bem como a abordagem desenvolvida por cada grupo de autores.

As primeiras pesquisas sobre o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias, referentes a partículas inertes, foram encontradas entre as décadas de 1970 e 1980. Este trabalhos concentraram-se no desenvolvimento de modelos empíricos, utilizando materiais como vidro, metais e carvão (Cheung et al., 1974; Chiba et al., 1979; Thonglimp et al. 1984b). Mourad et al. (1994), por sua vez, avaliaram misturas de grãos de milho e areia para aplicação em leitos de secagem de grãos.

A partir dos anos 2000, considerando a base de dados *Ei Compendex*, as primeiras correlações envolvendo a mistura de biomassa e inerte começaram a ser elaboradas. Destaca-se, deste momento, o estudo de Rao e Bheemarasetti (2001) com a mistura de casca de arroz, serragem e casca de amendoim e dois tipos de areia. A partir de então, as equações selecionadas da literatura entre os anos 2000 e 2017 (Tabela 3.2), descrevem a velocidade de fluidização aparente, U_{fa} , com as características da biomassa e do inerte.

Tabela 3.2 Correlações empíricas desenvolvidas para a velocidade de fluidização aparente considerando misturas de inertes e biomassas

Autores	Material	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	φ (-)	x_b (-)	Correlação	Abordagem
Otero e Corella (1971)	-	-	-	-	-	$U_{fa} = U_{mf,i}x_i + U_{mf,b}(1 - x_i)$ (3.2)	-
Goossens et al. (1971)	-	0,051-50,04	-	0,14-1,0	-	$Re_{fa} = [(33,7)^2 + 0,0408Ar_M]^{1/2} - 33,7$ (3.3)	$\bar{\rho}_M = \frac{\rho_{p,i}\rho_{p,b}}{x_i\rho_{p,b} + (1 - x_i)\rho_{p,i}}$ $\bar{d}_M = \frac{(1 - x_i)\rho_{p,i} + x_i\rho_{p,b}}{x_i\rho_{p,b}d_{p,i} + (1 - x_i)\rho_{p,i}d_{p,b}} d_{p,i}d_{p,b}$
Cheung et al. (1974)	Vidro Bronze Esfera de açúcar <i>Ballotini</i>	0,096-1,305	-	-	-	$U_{fa} = U_K \left(\frac{U_G}{U_K} \right)^{x_G^2}$ (3.4)	K : menor partícula/ G : maior partícula Apenas avaliaram a mudança de tamanho.
Chiba et al. (1979)	Cobre Vidro Carvão Sílica	0,163-0,254 0,115-0,385 0,755 0,359	8390-8900 2520 1080 190	-	0-1,0	$U_{fa} = \frac{U_F}{\left(1 - U_F/U_P\right)x_F + U_F/U_P}$ (3.5)	$Re_{fa} < 11,6$ F : partícula fluida P : partícula empacotada
Thonglimp et al. (1984b)	Vidro	0,112-2,125	2635	1,0	0,1-0,9	$Re_{fa} = [(19,9)^2 + 0,03196Ar_M]^{1/2} - 19,9$ (3.6)	Eq. (1.5): $Re_{fa} < 20$ Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M
	Alumina Aço	0,450-0,860 0,225-0,755	1607 7425	0,9 ± 0,1 1,0		$Re_{fa} = 3,40 \cdot 10^{-3} Ar_M^{0,9} Mv^{-0,1}$ (3.7)	
Mourad et al. (1994)	Grão de milho Areia	6,3-8,0 0,250-0,315	1200 2650	0,65 0,85	0,025-0,75	$Re_{fa} = 5,52 \cdot 10^{-4} Ar_M^{1,044}$ (3.8)	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M

Tabela 3.2 Correlações empíricas desenvolvidas para a velocidade de fluidização aparente considerando misturas de inertes e biomassas

Autores	Material	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	φ (-)	x_b (-)	Correlação	Abordagem	
Rao e Bheemarasetti (2001)	Casca de arroz	2x1x10	-	-	0,02-0,15	$U_{fa} = \frac{dp_{eff}^2(\rho_{eff} - \rho)g}{1650\mu}$ (3.9)	$dp_{eff}^2 = k \left\{ d_{p,i} \left[\left(\frac{\rho_{p,i}}{\rho_{p,b}} \right) \left(\frac{d_{p,b}}{d_{p,i}} \right) \right]^{m_i/m_b} \right\}^2$	
	Serragem	0,800-1,000	-	-				$k = 20d_{p,i} + 0,36$
	Casca de amendoim	0,800-1,200	-	-				$\rho_{eff} = \frac{m_i\rho_{p,i} + m_b\rho_{p,b}}{m_i + m_b}$
	Areia	0,250-0,600	2500-2700	-				
Zhong et al. (2008)	Chip madeira	0,89	564	Esférico	0,0-1,0	$U_{fa} = 1,45 \cdot 10^{-3} \left[\frac{d_{pe}^2(\rho_{pe} - \rho)}{\mu} \left(\frac{\rho_{pe}}{\rho} \right)^{1,23} \right]^{0,363}$ (3.10)	$\rho_{pe} = x_i\rho_{p,i} + x_b\rho_{p,b}$ $d_{pe} = d_{p,b} \left[\left(\frac{\rho_{p,b}}{\rho_{p,i}} \right) \left(\frac{d_{p,i}}{d_{p,b}} \right) \right]^{x_b/x_i}$	
	Feijão Mungo	3,2	1640	Esférico				
	Painço	-	-	Esférico				
	Hastes milho	4,0	274	Alongado				
	Haste de algodão	3,4-6,5	365	Alongado				
	Areia	1,0	2700	-				
Basalto	2,8	1870	-					
Óxido de Al	-	-	-					
Si e Guo (2008)	Haste de trigo	0,800-1,300	1200	0,084	0,2-0,6 0,3-0,8	$Re_{fa} = [(C_1)^2 + C_2 Ar_M]^{1/2} - C_1$ (3.11) $C_1 = 25,65\varphi_b^{0,21}\varphi_i^{0,15}$ $C_2 = 0,056\varphi_b^{-0,045}\varphi_i^{0,025}$	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M	
	Serragem	0,700-1,200	1515	0,125				
	Areia	0,255	2650	0,482				
Oliveira et al. (2013)	Bagaço de sorgo	0,125-0,850	871	0,57-0,59	0,05-0,15	$U_{fa} = 1,17 \cdot 10^{-4} \left[\frac{d_{pe}^2(\rho_{pe} - \rho)g}{\mu} \left(\frac{\rho_{pe}}{\rho} \right)^{1,23} \right]^{0,4916}$ (3.12)	$\rho_{pe} = x_b\rho_{p,b} + x_i\rho_{p,i}$ $d_{pe} = d_{p,i} \left[\left(\frac{\rho_{p,i}}{\rho_{p,b}} \right) \left(\frac{d_{p,i}}{d_{p,b}} \right) \right]^{x_b/x_i}$	
	Casca de soja	0,150-0,850	1051	0,60-0,70				
	Resíduo de tabaco	0,128-0,850	727,1	0,50-0,65				
	Areia	0,212-1,400	2695,5	0,76-0,83				

Tabela 3.2 Correlações empíricas desenvolvidas para a velocidade de fluidização aparente considerando misturas de inertes e biomassas

Autores	Material	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	φ (-)	x_b (-)	Correlação	Abordagem
Paudel e Feng (2013)	Sabugo de milho	1,040	1080	Angular	0,1-1,0	$Re_{fa} = \left\{ (30,28)^2 + \left[0,046(1 - x_b) + 0,108x_b^{1/2} \right] Ar_M \right\}^{1/2} - 30,28$	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M
	Casca de noz	0,1-0,856	1200	Esférico/ Angular			
	Areia	0,241	2630	Esférico			
	Esfera de vidro	0,383	2500	Esférico			
	Alumina	0,490	3940	Angular			
Kumoro et al. (2014)	Sabugo de milho	1,040	1080	0,71	0,05-1,0	$Ar_M = 914,2\varphi_M^2 Re_{mf} + 14,838 Re_{mf}^2$	(3.14) $\varphi_M = \sum x \varphi$
	Casca de arroz	1,560	635	0,18			
	Areia	0,241-0,350	2450-2630	0,94			
						$Ar_M = 1176(1 - x_1)\varphi_M^2 Re_{mf} + 22,432x_1^{1/2} Re_{mf}^2$	(3.15) $\rho_{eff} = \frac{m_i \rho_{p,i} + m_b \rho_{p,b}}{m_i + m_b}$ $\bar{d}_M = \frac{(1 - x_i)\rho_{p,i} + x_i \rho_{p,b}}{x_i \rho_{p,b} d_{p,b} + (1 - x_i)\rho_{p,i} d_{p,i}} d_{p,i} d_{p,b}$
Tannous e Lourenço (2015)	Madeira de eucalipto	0,508-1,993	394,9	0,36-0,50	0,05-0,20	$Re_{fa} = [(33,9)^2 + 0,051 Ar_M]^{1/2} - 33,9$	(3.16) Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M $1,4 < Re_{fa} < 14$ $340 < Ar_M < 2,1 \cdot 10^4$
	Endocarpo do tucumã	0,502-2,017	1115	0,81-0,89			
	Areia	0,331	2636	0,85			
Pérez et al. (2017)	Bagaço de cana	0,075-9,500	465,9-605,2	0,27-0,55	0,02-0,15	$Re_{fa} = 0,00002 Ar_M^{1,7125}$	(3.17) Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M
	Areia	0,255	2585,3	0,78			

Com relação à configuração dos modelos, a primeira tentativa de ajuste, realizada por Otero e Corela (1971, *apud* Thonglimp et al., 1984b), considerava apenas uma média ponderada pelas frações mássicas das velocidades mínimas de fluidização do material fluido, ou seja, que tem U_{mf} menor, e do material compactado, com maior U_{mf} . Cheung et al. (1974) e Chiba et al. (1979) também consideraram as velocidades mínimas de fluidização de cada material em suas correlações.

Goossens et al (1971, *apud* Lourenço, 2012) parte das considerações de Wen e Yu (1966), os quais trabalharam a partir da Equação de Ergun (1952) e o balanço de forças no estado de mínima fluidização, rearranjados conforme apresentado na Equação 3.17, considerando as definições dos números de Reynolds (Equação 3.18) e de Arquimedes (Equação 3.19):

$$Re_{fa} = \left[\left(\frac{K_2}{2K_1} \right)^2 + \frac{Ar}{K_1} \right]^{1/2} - \frac{K_2}{2K_1} \quad (3.18)$$

$$Re_{fa} = \frac{d_p U_{fa} \rho}{\mu} \quad (3.19)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2} \quad (3.20)$$

Os autores utilizam a Equação 3.2, de Wen e Yu (1966), mas sugerem uma definição para o diâmetro de mistura (\bar{d}_M) e para a massa específica de mistura ($\bar{\rho}_M$), de forma a considerar as propriedades de cada material combinados, conforme descrito na coluna “Abordagem” da Tabela 3.2.

Alguns autores (THONGLIMP et al., 1984b; SI e GUO, 2008; PAUDEL e FENG, 2013; TANNOUS e LOURENÇO, 2015) também utilizaram estas definições em suas correlações, mas determinaram outros valores para as constantes K_1 e K_2 . Thonglimp et al. (1984b), Mourad et al. (1994) e Pérez et al. (2017) usaram a definição de Gossens et al. (1971), porém ajustaram os dados a um modelo do tipo série de potência. Os demais autores da Tabela 3.2 fazem suas próprias definições de diâmetro médio e massa específica de mistura, além de obterem modelos empíricos diferenciados para o cálculo de U_{fa} .

Os trabalhos de Si e Guo (2008) e Kumoro et al. (2014) merecem destaque, pois a esfericidade das partículas foi considerada como uma propriedade relevante dos materiais e incluída nos modelos propostos. Os primeiros autores adicionam as esfericidades de biomassa e inerte multiplicados a diferentes potências, enquanto o segundo grupo de estudo as incluíram na forma de um somatório ponderado pelas frações mássicas de cada material.

3.7.2. Velocidade de Fluidização Completa

A Tabela 3.3 apresenta as correlações encontradas na literatura para o cálculo da velocidade de fluidização completa, bem como descreve as partículas que foram utilizadas para a obtenção do modelo. O primeiro estudo selecionado foi o de Noda et al. (1986), que avaliaram a velocidade de fluidização completa da mistura entre partículas grandes e de formato irregular, e partículas finas e arredondadas. Os autores propuseram uma nova correlação em que os parâmetros são obtidos a partir das características de diâmetro médio e massa específica de cada tipo de partícula. A comparação dos valores obtidos pela correlação com velocidades empíricas da literatura resultou em um erro relativo máximo de 35%, o que os levou a concluir que uma correlação empírica nem sempre é satisfatória para descrever um determinado sistema binário, porque sua configuração depende fortemente da composição da mistura. Logo, muitas vezes é necessário construir correlações específicas para cada sistema.

Bilbao et al. (1987), neste contexto, definiram uma correlação para a mistura de palha de trigo e areia, visando a gaseificação da biomassa. Os autores utilizam como configuração da equação uma combinação da velocidade mínima de fluidização de cada componente e sua respectiva fração volumétrica. Como não foi possível obter a U_{mf} da biomassa experimentalmente, porque a palha de trigo não fluidizou sozinha, uma correlação para seu cálculo foi proposta a partir do ajuste linear da curva que relaciona U_{fa} da mistura com a fração volumétrica de areia. A U_{mf} da biomassa foi então obtida graficamente na intercepção da reta com o eixo y, ou seja, quando a fração volumétrica da mistura atingiu zero. A correlação para U_{mf} da biomassa está descrita na coluna “Abordagem” da Tabela 3.3.

Mourad et al. (1994), Gauthier et al. (1999) e Tannous e Lourenço (2015) partiram da configuração de um modelo do tipo série de potência para construir suas correlações. Gauthier et al. (1999) trabalharam com combinações de diferentes tamanhos de areia, com mesma massa específica. Assim, seu estudo apenas se preocupa com o cálculo do diâmetro de mistura feito a partir da relação de Sauter. Os demais autores utilizaram as definições de Goossens et al. (1971) para a identificação das características da mistura.

Tabela 3.3 Estudos da literatura para a obtenção de correlações empíricas para a velocidade de fluidização completa de misturas binárias

Autores	Material	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	ϕ (-)	x_b (-)	Correlação	Abordagem
Noda et al. (1986)	Ferro	0,654-1,250	440	-	0-1,0	$Ar_M = ARe_{fc}^2 + BRe_{fc}$ (3.21)	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M B: $d_b/d_i < 3$; leito completamente misturado
	Madeira	0,647-0,772	7530			$A = 36,2 \left(\frac{d_{p,b}}{d_{p,i}} \frac{\rho_{p,b}}{\rho_{p,i}} \right)^{-0,196}$ (3.22)	
	Grãos	0,576-0,785	1220-1260			$B = 1397 \left(\frac{d_{p,i}}{d_{p,b}} \frac{\rho_{p,b}}{\rho_{p,i}} \right)^{0,296}$ (3.23)	
	Borracha	0,283	1450				
	Areia	0,139-0,454	2600				
	Vidro	0,100-0,843	2520				
Bilbao et al. (1987)	Palha de trigo	0,346-1,788	350	-	0,2-0,5 (fração vol.)	$U_{fc} = U_{mf,b} - (U_{mf,b} - U_{mf,i})X_i$ (3.24)	$U_{mf,b} = 50d_{p,b}^{0,84}$
	Areia	0,155-0,346	2100	-		$X_i = \frac{x_i}{x_i + \frac{\rho_{p,i}}{\rho_{p,b}}(1 - x_i)}$ (3.25)	
Mourad et al. (1994)	Grão de milho	6,3-8,0	1200	0,65	0,025-0,75	$Re_{fc} = 1,06.10^{-3}Ar_M^{1,040}$ (3.26)	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M
	Areia	0,250-0,315	2650	0,85			
Gauthier et al. (1999)	Areia	0,18-2,825	-	-	0,09-0,57	$Re_{fc} = 5,2.10^{-3}Ar_M^{0,777}$ (3.27)	$1,35 < Re_{fc} < 113$, $1800 < Ar_M < 5.10^5$ $d_p = \frac{1}{\Sigma^x / d_p}$; não calcula $\bar{\rho}_M$
Tannous e Lourenço (2015)	Mad. Eucalipto	0,508-1,993	394,9	0,36-0,50	0,05-0,20	$Re_{fc} = 1,23.10^{-2}Ar_M^{0,8086}$ (3.28)	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M $1 < Re_{fc} < 52$, $340 < Ar_M < 1,5.10^4$
	Endo. tucumã	0,502-2,017	1115	0,81-0,89			
	Areia	0,331	2636	0,85			
Pitsukha et al. (2017)	Péletes de palha	6 (D) / 10 (H) cilindros	1240	-	0-1,0	$\frac{U_{fc}}{U_{mf,i}} - 1 = \left(\frac{U_{mf,b}}{U_{mf,i}} - 1 \right) x_b^{1,4}$ (3.29)	
	Areia	0,315-0,500	2600	-			
Vasconcelos et al. (2018)	Res. de sisal	0,2 – 0,8	1700,4	-	0,05-0,25	$Re_{fc}^* = A_1[A_2 + A_3 (Ar^*)^{0,8017}]$ (3.30)	$Ar^* = \frac{d_{p,i}^3 \rho \rho_{p,b} g}{\mu^2}$ $Re_{fc}^* = \frac{\rho U_{fc} d_{p,i}}{\mu}$
						$A_1 = \rho / \rho_b$	
						$A_2 = -1408 \frac{\rho_{p,i}}{\rho_{p,b}} \frac{d_{p,b}}{d_{p,i}} + 13890$ $- 36000 x_b$ $A_3 = 40 \left(\frac{\rho}{\rho_{p,b}} \right)^{0,1983}$	
	Areia	0,2 – 0,8	2693,7	-			

Pitsukha et al. (2017) e Vasconcelos et al. (2018) apresentaram configurações diferentes em suas correlações para U_{fc} , pois observaram que os modelos empíricos baseados na equação de Ergun (1952) não são adequados para os sistemas em estudo. O primeiro grupo de autores construiu uma relação entre as velocidades mínimas de fluidização de cada material e as frações mássicas aplicadas. Esta relação foi possível porque os autores conseguiram medir a velocidade mínima de fluidização da biomassa, pois trabalham com péletes de palha, os quais apresentaram tamanho e massa específica adequados para a determinação experimental da velocidade característica.

O segundo grupo de autores obteve um modelo empírico a partir de um planejamento composto central rotacional dos experimentos, variando os diâmetros de biomassa e inerte, bem como a fração mássica de biomassa. A correlação foi determinada após a análise da combinação de diferentes grupos adimensionais. É importante ressaltar que, para este estudo, os autores adaptaram as definições do número de Arquimedes (Ar) e do número de Reynolds (Re), como pode ser visto na coluna “Abordagem” da Tabela 3.3. No primeiro caso, a definição de Ar não considera a diferença entre as massas específicas do sólido e do fluido, mas apenas a do sólido (no caso, da biomassa). No segundo caso, Re é calculado considerando apenas o diâmetro médio do inerte, ao invés do diâmetro de mistura.

3.7.1. *Velocidades de Fluidização Inicial e de Segregação*

As Tabelas 3.4 e 3.5 trazem informações sobre estudos da literatura que se propuseram a construir modelos empíricos para a determinação das velocidades de fluidização inicial e de segregação de misturas binárias. Verifica-se que poucos trabalhos da literatura se preocuparam em avaliar estas velocidades, apesar de serem importantes na identificação dos fenômenos fluidodinâmicos que ocorrem dentro de um leito fluidizado.

Gauthier et al. (1999) trazem uma correlação do tipo lei de potência para o cálculo de U_{fi} , obtida a partir de seu estudo com misturas de areia com diferentes diâmetros médios. Tannous e Lourenço (2015), por sua vez, propuseram uma correlação baseada na equação de Ergun para o cálculo da mesma velocidade, sendo que o ajuste foi feito considerando dados próprios e da literatura. Estas mesmas autoras foram as únicas que determinaram uma correlação para a velocidade de segregação, como descrito na Tabela 3.5. Neste caso, o ajuste foi feito apenas para os dados de mistura de eucalipto e endocarpo de tucumã com areia. Ressalta-se que esta equação foi revista em Tannous et al. (2018).

Tabela 3.4 Estudos da literatura para a obtenção de correlações empíricas para a velocidade de fluidização inicial para misturas binárias

Autores	Material	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	ϕ (-)	x_b (-)	Correlação	Abordagem
Gauthier et al. (1999)	Areia	0,18-2,825	-	-	0,09-0,57	$Re_{fi} = 2,2 \cdot 10^{-3} Ar_M^{0,818}$ (3.31)	$0,78 < Re_{fc} < 78$ $1800 < Ar_M < 5 \cdot 10^5$ $d_p = \frac{1}{\Sigma x / d_p}$; não calcula $\bar{\rho}_M$
Tannous e Lourenço (2015)	Mad. eucalipto	0,508-1,993	394,9	0,36-0,50	0,05-0,20	$Re_{fi} = [15,8^2 + 0,019 Ar_M]^{1/2} - 15,8$ (3.32)	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M $0,2 < Re_{fc} < 7$ $400 < Ar_M < 1,5 \cdot 10^4$
	Endo. tucumã	0,502-2,017	1115	0,81-0,89			
	Areia	0,331	2636	0,85			

Tabela 3.5 Estudo da literatura para a obtenção de correlação empírica para a velocidade de segregação para misturas binárias

Autores	Material	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	ϕ (-)	x_b (-)	Correlação	Abordagem
Tannous et al. (2018)	Mad. eucalipto	0,508-1,993	394,9	0,36-0,50	0,05-0,20	$Re_s = 8,0 \cdot 10^{-4} Ar_M^{1,04}$ (3.33)	Usa as definições de Goossens et al. (1971) para $\bar{\rho}_M$ e \bar{d}_M $340 < Ar_M < 1,5 \cdot 10^4$
	Endo. tucumã	0,502-2,017	1115	0,81-0,89			
	Areia	0,331	2636	0,85			

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Materiais sólidos selecionados

A palha de milho, material que envolve a espiga (Figura 4.1), foi obtida em uma propriedade rural particular da cidade de Nova Odessa/SP. A biomassa foi seca ao sol e armazenada em local seco e arejado até sua utilização. Para garantir um produto mais homogêneo após o processo de moagem, foi tomado o cuidado de retirar da palha os resíduos de estigmas e do sabugo, ficando apenas com a biomassa desejada.

Figura 4.1 Indicação do resíduo da cultura de milho utilizado

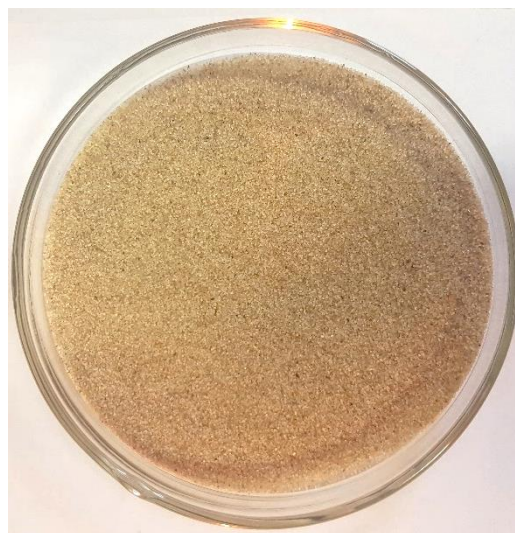


Espiga de milho

Palha de milho
(resíduo usado
como biomassa no
projeto)

A areia de tipo quartzosa (Figura 4.2) foi fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).

Figura 4.2 Areia utilizada como inerte nos experimentos



4.2. Moagem da Biomassa

Para a cominuição da palha de milho foi utilizado um moinho de facas, pertencente ao Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos (DETF), da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UNICAMP. Uma tela de retenção com abertura de 3 mm no formato circular foi empregada a fim de selecionar os finos das partículas. Amostras de 50 g da biomassa foram utilizadas em cada processo de moagem. O material foi mantido no moinho pelo tempo de residência de 10 min, removido e novamente alimentado ao mesmo, de forma a ser reprocessado por três vezes, com mesmo tempo de residência.

Estas condições de moagem foram utilizadas a fim da obtenção de uma maior quantidade de material nos tamanhos de estudo escolhidos, os quais foram aproximadamente de 0,250 mm, 0,500 mm e 1,00 mm. A escolha destes tamanhos foi feita baseando-se no trabalho de Lourenço (2012), considerando o fato de que partículas de pequeno tamanho (menor que 1 mm) promovem maior transferência de calor e massa e apresentam melhor comportamento de mistura com o inerte. Maiores informações sobre como os parâmetros do processo de moagem foram definidos encontram-se no Anexo A (item 9).

Após a moagem, o material foi separado utilizando um conjunto de sete (7) peneiras da série Tyler com *mesh* 14, 20, 28, 35, 48, 65, 100, as quais correspondem aos diâmetros de abertura 1,18 mm, 0,850 mm, 0,600 mm, 0,420 mm, 0,297 mm, 0,210 mm, 0,150 mm, respectivamente. O material retido entre as peneiras de *mesh* -20+28, -35+48 e -65+100 foi separado para a realização do estudo.

4.3. Amostragem

A fim de garantir amostras representativas de cada tamanho de biomassa para a determinação do diâmetro médio e a realização das análises das propriedades físicas (esfericidade e massa específica), o material moído e peneirado passou por duas etapas de amostragem. Na primeira etapa, foram selecionadas 80 g do montante total, a partir da seleção de porções distribuídas em uma bandeja de metal (30 x 21 x 4,5 cm).

As seleções para cada tamanho de partícula foram realizadas conforme apresentado na Tabela 4.1. O material de determinado tamanho foi separado em um número de bandejas de quatro (4) ou oito (8), sendo que cada bandeja foi alimentada com uma massa de biomassa de 40 ou 80 g. Esta massa de material foi uniformizada, de maneira a se obter uma camada constante e dividida em oito partes iguais. Destas partes, duas (2) ou quatro (4) foram reservadas.

Tabela 4.1 Primeira etapa de amostragem das biomassas

Biomassa	d_m (mm)	Nº de bandejas	Massa por bandeja (g)	Nº de divisões recolhidas
Palha de Milho	0,254	4	40	4
	0,510	4	80	2
	1,015	4	80	2

Por exemplo, para a palha de milho de tamanho $d_m = 0,510$ mm, 80 g de material foram colocados em uma bandeja (Tabela 4.1 – massa por bandeja), espalhados até se obter uma camada uniforme e divididos em oito partes (Figura 4.3a). Duas partes foram selecionadas e separadas para a amostragem (Figura 4.3b; nº de divisões recolhidas na Tabela 4.1). O procedimento foi repetido quatro vezes (número de bandejas da Tabela 4.1), até que se obter 80 g do montante total para a segunda etapa de amostragem

Figura 4.3 Imagens da seleção de amostras (palha de milho, $d_m = 0,510$ mm)**(a)** Divisão do material em oito partes**(b)** Separação de duas partes

Para a segunda etapa de seleção, as 80 g foram subdivididas em oito porções de cerca de 10 g por meio de um divisor de amostras rotativo acoplado a um alimentador vibratório. A vibração do alimentador foi mantida no nível 15. Três (3) das oitos (8) porções obtidas pelo divisor foram selecionadas para a realização da análise da distribuição granulométrica.

4.4. Análise Estatística

Esta seção traz as fórmulas estatísticas aplicadas nos ensaios de caracterização (diâmetro médio e esfericidade) e no estudo fluidodinâmico (na comparação entre os parâmetros fluidodinâmicos).

O valor médio (\bar{y}) da característica avaliada foi calculado da seguinte maneira (Equação 4.1):

$$\bar{y} = \frac{\sum_1^{Nr} y_i}{N} \quad (4.1)$$

na qual y_i refere-se a propriedade físicas da partícula sólida em análise (diâmetro médio e esfericidade) e N o número de amostras avaliadas.

O cálculo do desvio padrão (σ_c) das mesmas propriedades foi feito a partir da Equação 4.2:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_1^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1}} \quad (4.2)$$

E a incerteza percentual (λ) calculada conforme Equação 4.3:

$$\lambda (\%) = 100 \times \frac{1}{N} \frac{\sum |y_i - \bar{y}|}{\bar{y}} \quad (4.3)$$

As equações para o cálculo do erro relativo e erro relativo médio absoluto foram obtidas em Vuolo (1996). O erro relativo (ER) percentual entre um parâmetro fluidodinâmico experimental (y_{exp}) e teórico (y_{teo}), os quais referem-se as velocidades características U_{fi} , U_{fa} , U_s e U_{fc} , foi calculado para cada ponto como:

$$ER (\%) = 100 \times \frac{|y_{teo} - y_{exp}|}{y_{exp}} \quad (4.4)$$

O erro relativo médio absoluto (ERMA) percentual, calculado para as correlações empíricas avaliadas nos itens 5.4 e 5.6 da seção Resultados e Discussão, foi calculado pela somatória do erro relativo determinado para cada velocidade, dividido pelo número de amostras (N), conforme Equação 4.5:

$$ERMA(\%) = \frac{1}{N} ER \quad (4.5)$$

4.5. Distribuição Granulométrica e Diâmetro Médio das Partículas

Para a determinação da distribuição granulométrica e do diâmetro médio de Sauter das partículas de biomassa e areia, foram aplicados diferentes conjuntos de peneiras da série Tyler, conforme o tamanho do material a ser caracterizado (Tabela 4.2). Amostras de 10 g foram empregadas e os ensaios feitos em triplicata. Ressalta-se que o método de Sauter foi escolhido para a análise por ser muito usado na identificação do tamanho de partículas de biomassa (CORTEZ et al., 2014).

Tabela 4.2 Peneiras aplicadas na identificação da distribuição granulométrica

Biomassa $d_m = 1,02$ mm		Biomassa $d_m = 0,510$ mm		Biomassa $d_m = 0,254$ mm		Areia $d_m = 0,359$ mm	
<i>Mesh</i>	$d_{\#}$ (mm)	<i>Mesh</i>	$d_{\#}$ (mm)	<i>Mesh</i>	$d_{\#}$ (mm)	<i>Mesh</i>	$d_{\#}$ (mm)
10	1,68	20	0,850	35	0,420	28	0,600
14	1,18	28	0,600	48	0,297	35	0,420
20	0,850	35	0,420	65	0,210	48	0,297
28	0,600	48	0,297	100	0,150	65	0,210
35	0,420	65	0,210	150	0,106	100	0,150

As peneiras foram colocadas em um vibrador por um tempo de 10 min e amplitude de frequência igual a 9. Mediu-se a massa das peneiras antes e após a vibração, sendo a diferença de massa considerada igual à quantidade de material retido na peneira j (m_j). A fração retida (x_j), Equação 4.6, foi calculada dividindo-se esta massa pela massa total de material retida em todas as peneiras (m_t). Ressalta-se que a perda de massa entre a medida no início e após o peneiramento foi considerada desprezível por ser, em média, de 0,56%.

$$x_j = \frac{m_j}{m_t} \quad (4.6)$$

O diâmetro médio foi considerado como a média aritmética entre os diâmetros da peneira superior ($d_{\#-}$) e inferior ($d_{\#+}$), conforme Equação 4.7:

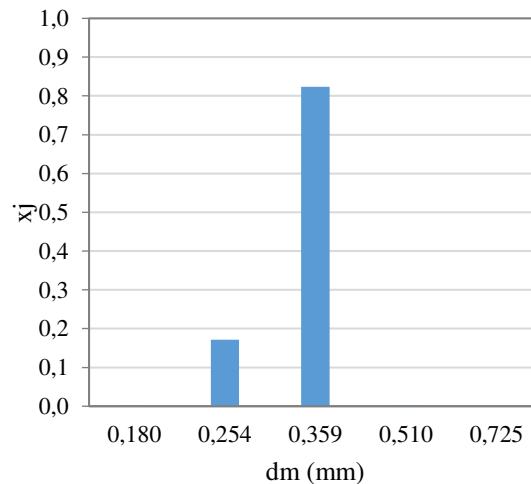
$$d_{mj} = \frac{d_{\#-} + d_{\#+}}{2} \quad (4.7)$$

E o diâmetro médio de Sauter (\bar{d}_p) foi calculado pela Equação 4.8:

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_j}{d_{mj}}} \quad (4.8)$$

A distribuição granulométrica média para a areia e os três tamanhos selecionados da palha de milho encontram-se dispostos nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. Em todos os casos foi observada uma distribuição em que quantidades acima de 75% ficaram retidas na peneira com a abertura média selecionada. Os diâmetros médios de Sauter serão utilizados como tamanho de referência dos materiais e aplicados no estudo fluidodinâmico das misturas.

Figura 4.4 Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter para a areia



$$\bar{d}_p = 0,335 \pm 0,001 \text{ mm}$$

Os diferentes tamanhos de palha de milho obtidos após moagem, separação e caracterização granulométrica estão ilustrados na Figura 4.6.

4.6. Esfericidade

A esfericidade dos três diâmetros de partículas de biomassa selecionados foi determinada a partir do uso do software APOGEO[®], desenvolvido por Silva e Tannous (2012) no Laboratório de Tecnologia de Partículas e Processos Multifásicos (LaProM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). O programa faz a leitura das dimensões de comprimento e largura de uma imagem das partículas digitalizada e realiza o cálculo da esfericidade a partir de modelos matemáticos da literatura.

A imagem digitalizada das partículas foi obtida por um *scanner*. Para os materiais com tamanho maior e intermediário ($\bar{d}_p = 0,962$ e $0,496$ mm), três conjuntos de amostras, com 52 ± 9 partículas em cada conjunto, foram distribuídas na mesa do equipamento e posicionados ao redor de um círculo de papel, com diâmetro de 60 mm, utilizado como tamanho de referência.

Figura 4.5 Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter para a palha de milho

(a) $\bar{d}_p = 0,253 \pm 0,001$ mm

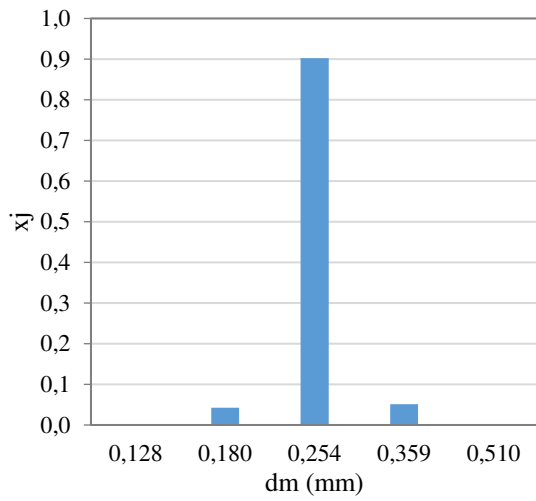
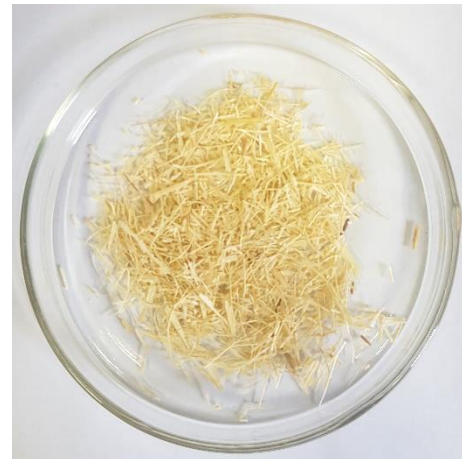
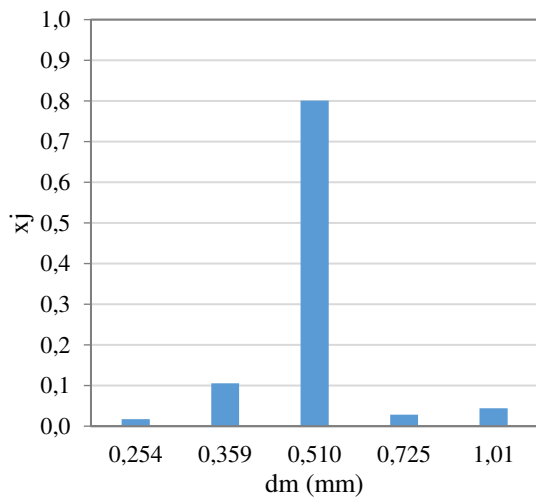


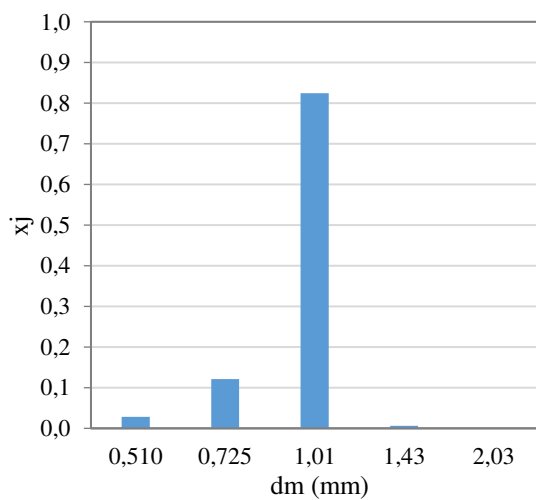
Figura 4.6 Imagens da palha de milho após moagem e peneiramento



(b) $\bar{d}_p = 0,496 \pm 0,002$ mm

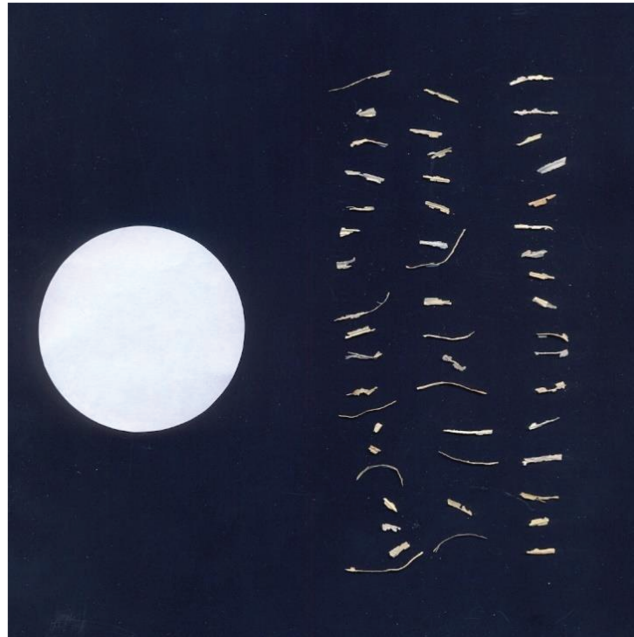


(c) $\bar{d}_p = 0,962 \pm 0,005$ mm



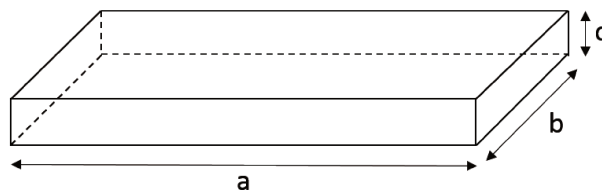
Para o material com menor tamanho ($\bar{d}_p = 0,253$ mm) foram digitalizados dois conjuntos de amostras com 343 ± 172 partículas cada conjunto, devido às menores dimensões da biomassa e maior dificuldade de processamento da imagem pelo software. A Figura 4.7 mostra um exemplo de amostra para a palha de milho, $\bar{d}_p = 0,962$ mm.

Figura 4.7 Amostragem de partículas digitalizadas (palha de milho, $\bar{d}_p = 0,962$ mm)



Para as partículas deste estudo, aproximou-se seu formato a de um paralelepípedo (Figura 4.8), no qual “*a*” indica o comprimento (dimensão maior), “*b*” a largura e “*c*” a espessura. Os parâmetros “*a*” e “*b*” foram obtidos por meio do processamento do software, enquanto o parâmetro “*c*” foi determinado a partir da medida desta dimensão utilizando-se um micrômetro. Mensurou-se 50 partículas de cada tamanho selecionado, devido à dificuldade de manuseio do material e irregularidade das partículas.

Figura 4.8 Esquema do formato aproximado das partículas de biomassa



Quatro metodologias diferentes foram aplicadas pelo programa para o cálculo da esfericidade das partículas: Wadell (1935), Riley (1941), Curray (1951) e Massarani e

Peçanha (1986). As equações referentes para cada um destes métodos foram adaptadas considerando as dimensões “a”, “b” e “c” do paralelepípedo.

Método 1: Esfericidade segundo Wadell (1935)

O autor considera a esfericidade como a razão entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula (A_{se}) e a área superficial da partícula (A_{sp}):

$$\varphi_w = \frac{A_{se}}{A_{sp}} = \frac{2\pi \left(\frac{3abc}{4\pi}\right)^{2/3}}{ab + ac + bc} \quad (4.9)$$

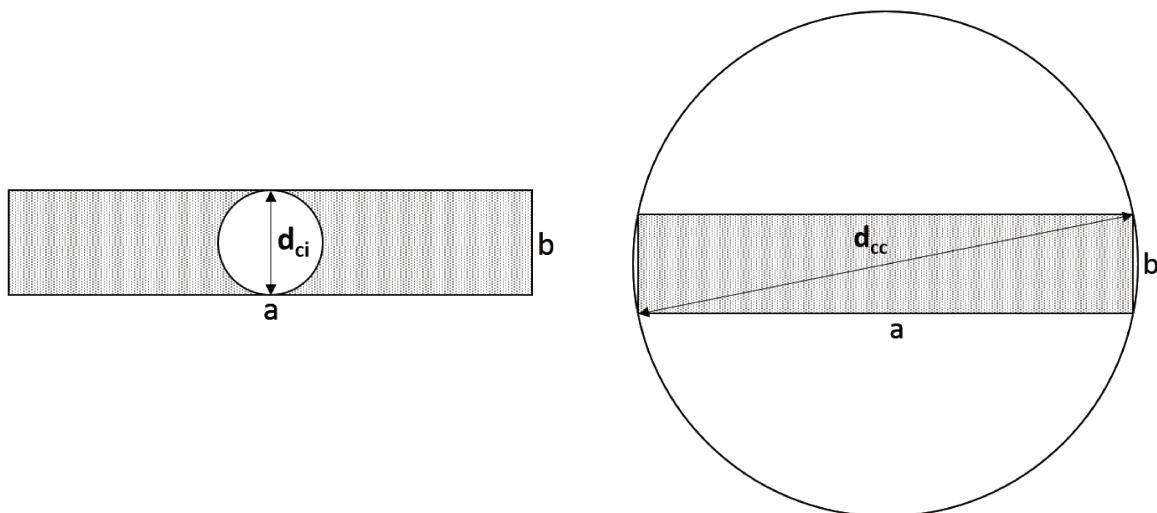
Método 2: Esfericidade segundo Riley (1941)

Riley define esfericidade como a raiz quadrada da razão entre o diâmetro da circunferência inscrita (d_{ci}) e o diâmetro da menor circunferência circunscrita (d_{cc}) às partículas:

$$\varphi_r = \sqrt{\frac{d_{ci}}{d_{cc}}} = \sqrt{\frac{b}{(a^2 + b^2)^{1/2}}} \quad (4.10)$$

Para que a definição destes diâmetros fosse mais bem visualizada, a Figura 4.9 traz um esboço das circunferências inscrita e circunscrita ao retângulo que representa a partícula. Ressalta-se que este método avalia apenas a partícula em duas dimensões, sendo a espessura “c” desconsiderada nos cálculos.

Figura 4.9 Esboço da circunferência inscrita e circunscrita à partícula de biomassa na forma retangular



Legenda: comprimento (a), largura (b),
diâmetro da circunferência inscrita (d_{ci}),
diâmetro da circunferência circunscrita (d_{cc})

Método 3: Esfericidade segundo Curray (1951)

Curray associa a esfericidade à raiz cúbica da razão entre o volume do sólido (V_s) e o volume de uma esfera circunscrita a este sólido (V_{ec}), representada na Equação 4.11. A esfera circunscrita ao sólido pode ser mais bem visualizada pela Figura 4.10.

$$\varphi_c = \sqrt[3]{\frac{V_s}{V_{ec}}} = \sqrt[3]{\frac{6abc}{\pi(a^2 + b^2 + c^2)^{3/2}}} \quad (4.11)$$

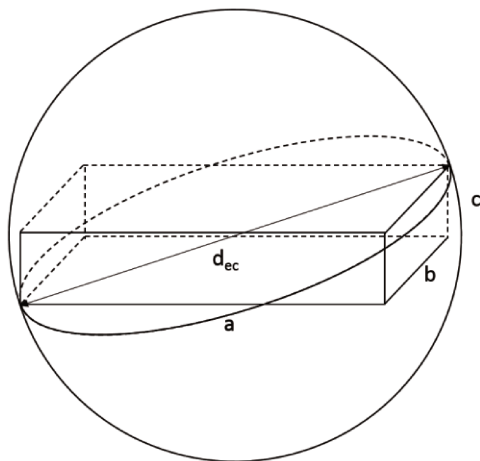
Método 4: Esfericidade segundo Massarani e Peçanha (1986)

Massarani e Peçanha (1986) estabelecem a esfericidade como a razão entre o diâmetro de uma circunferência inscrita à forma geométrica representativa da partícula (d_{ci}) e o diâmetro de uma circunferência circunscrita a esta partícula (d_{cc}):

$$\varphi_{mp} = \frac{d_{ci}}{d_{cc}} = \frac{b}{(a^2 + b^2)^{1/2}} \quad (4.12)$$

Os diâmetros d_{ci} e d_{cc} estão representados na Figura 4.9, sendo os mesmos definidos para a aplicação da metodologia de Riley (1941). Verifica-se assim que esta metodologia também não considera a terceira dimensão do material.

Figura 4.10 Esboço da esfera circunscrita à partícula em formato paralelepípedo



Legenda:
comprimento (a), largura (b), espessura (c), e
diâmetro da esfera circunscrita (d_{ec})

Para a discussão dos resultados, também foi calculada a razão de aspecto das partículas, definida como a razão entre largura “b” e comprimento “a” das partículas (Equação 4.13):

$$\text{Razão de aspecto} = \frac{b}{a} \quad (4.13)$$

A fim de melhor compreender e discutir a esfericidade das partículas obtidas pelas diferentes metodologias foi necessário avaliar primeiro as médias das dimensões das partículas, bem como suas razões de aspecto, as quais se encontram dispostas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Dimensões e razões de aspecto das partículas

Biomassa	\bar{d}_p (mm)	a^1 (mm)	b^1 (mm)	c^2 (mm)	Razão de Aspecto ¹
Palha de Milho	0,253	1,63 ± 1,04	0,72 ± 0,11	0,10 ± 0,06	0,56 ± 0,21
	0,496	8,24 ± 3,83	1,16 ± 0,32	0,19 ± 0,06	0,18 ± 0,10
	0,962	9,56 ± 5,13	1,79 ± 0,39	0,20 ± 0,08	0,26 ± 0,19

¹Valor médio a partir das medidas do APOGEO[®] ²Valor médio a partir de medidas do micrômetro

A Tabela 4.4, por sua vez, apresenta os resultados de esfericidade da biomassa palha de milho. Para a areia, foram adotadas as esfericidades calculadas pelos métodos de Riley (1941) e Massarani e Peçanha (1986), feitas por Lourenço (2012). A autora utilizou o mesmo software (APOGEO[®]), entretanto, considerou que a partícula de areia tem um formato irregular, considerando assim somente a relação entre os diâmetros inscrito e circunscrito a partícula.

Tabela 4.4 Esfericidade das partículas determinadas por diferentes definições

Biomassa	\bar{d}_p (mm)	Esfericidade (-), APOGEO			
		Wadell (1935)	Riley (1941)	Curry (1951)	Massarani e Peçanha (1986)
Areia ¹	0,335		0,85 ± 0,11		0,73 ± 0,19
	0,253	0,32 ± 0,05	0,67 ± 0,12	0,34 ± 0,07	0,47 ± 0,15
	0,496	0,18 ± 0,03	0,40 ± 0,10	0,16 ± 0,05	0,17 ± 0,09
Palha de Milho	0,962	0,19 ± 0,04	0,47 ± 0,15	0,19 ± 0,08	0,24 ± 0,15

¹Medidas obtidas por Lourenço (2012)

A palha de milho, apresentou uma diminuição da esfericidade entre os diâmetros menor ($\bar{d}_p = 0,253$ mm) e intermediário ($\bar{d}_p = 0,496$ mm). Analisando as dimensões da Tabela 4.3 destes dois diâmetros, verificou-se um aumento de 5 vezes da dimensão “a”, 1,6 vezes da dimensão “b” e 1,9 vezes da dimensão “c”. Logo, as partículas de diâmetro intermediário são mais alongadas que as de menor diâmetro. Este alongamento leva a esfericidades menores para todas as metodologias consideradas. De fato, verificou-se que para os resultados obtidos para a palha de milho pela Equações 4.4 e 4.6, de Wadell (1935) e

Curry (1951), respectivamente, a diminuição da esfericidade entre os diâmetros menor e intermediário foi de 44% e 53%.

Comparando-se agora as esfericidades da palha de milho entre os diâmetros intermediário ($\bar{d}_p = 0,496$ mm) e maior ($d_p = 0,962$ mm) observaram-se duas situações diversas. Para os métodos de Wadell (1935) e Curry (1951), as esfericidades permaneceram praticamente constantes devido ao aumento proporcional das dimensões. Os dados da Tabela 4.3 indicam um aumento de 1,2 vezes da dimensão “a”, 1,5 vezes da dimensão “b” e 1,1 vezes da dimensão “c”, quando comparados os diâmetros intermediário e maior.

Para os métodos de Riley (1942) e Massarani e Peçanha (1986), entretanto, observou-se que as esfericidades aumentaram 18% e 41%, respectivamente, quando comparados os diâmetros intermediário e maior. Esta variação possivelmente se deve ao fato de que estes métodos levam em consideração apenas as dimensões “a” e “b” em seus cálculos, como pode ser conferido nas Equações 4.5 e 4.7, respectivamente. Como mencionado no parágrafo anterior, “a” aumentou 1,2 vezes e “b” 1,5 vezes entre estes diâmetros. Este aumento de “b” levou a um maior aumento no numerador das equações do que no denominador, o que pode ocasionar os maiores valores de esfericidade.

Considerando a forma de cálculo de cada método e os resultados obtidos, observou-se uma maior concordância entre os métodos de Wadell (1935), Curry (1951) e Massarani e Peçanha (1986). Quando se compara os primeiros dois autores, a maior incerteza percentual verificada foi de 5,88% para o diâmetro intermediário da palha de milho. Com relação aos dados de Wadell (1935) e Massarani e Peçanha (1986), a maior incerteza percentual observada foi de 19% para a esfericidade do menor diâmetro. A comparação entre Curry (1951) e Massarani e Peçanha (1986) forneceu uma incerteza percentual máxima de 16%, também para o menor diâmetro da palha de milho. As incertezas percentuais para todos os diâmetros de partícula estão dispostas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Incerteza percentual entre os métodos de esfericidade

Biomassa	\bar{d}_p (mm)	Wadell (1935) / Riley (1941)	Wadell (1935) / Curry (1951)	Wadell (1935) / Massarani e Peçanha (1986)	Riley (1941) / Curry (1951)	Riley (1941) / Massarani e Peçanha (1986)	Curry (1951) / Massarani e Peçanha (1986)
Palha de Milho	0,253	35,4	3,03	19,0	32,7	17,5	16,0
	0,496	37,9	5,88	2,86	42,9	40,4	3,03
	0,962	42,4	0,00	11,6	42,4	32,4	11,6

O método de Riley (1941) foi o que apresentou valores mais discrepantes. As incertezas percentuais observadas entre as outras metodologias e a de Riley (1941) chegaram a 42,9% (Tabela 4.5). Uma explicação a diferença tão acentuada pode estar na utilização da raiz quadrada, sugerida pela metodologia deste autor, que “amortece” as diferenças observadas entre as dimensões “a” e “b” das partículas. Haja visto que as partículas são aproximadas a paralelepípedos, não eram esperadas esfericidade elevadas como as determinadas pela equação de Riley (1941), conforme pode ser visto na Tabela 4.4.

Com relação as outras três metodologias, foi observada proximidade entre os resultados de Wadell e Curray, com incerteza percentual máxima de 5,88% (Tabela 4.5). Isso se deve ao fato das duas formas de cálculo considerar as três dimensões das partículas. Tannous et al. (2013) também verificaram que a terceira dimensão tem uma influência expressiva na esfericidade da madeira, aconselhando sua participação nos cálculos da esfericidade. Por fim, visto que a esfericidade de Wadell (1935) é mais comumente usada na descrição de partículas (Mandø e Rosendahl, 2010), esta foi escolhida como referência para este trabalho.

4.7. Massa Específica Aparente

A massa específica aparente (ρ_{ap}) da biomassa foi determinada pelo método da porosimetria de mercúrio, realizado no Laboratório de Revestimentos Cerâmicos (CRC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Esta técnica tem como fundamento o fato de que o mercúrio apresenta alta tensão superficial, de forma que ao se aplicar uma certa pressão no sistema, o líquido apenas entre em contato com a superfície da partícula.

Uma partícula da biomassa de massa (m_a) foi colocada em um penetrômetro de volume (V_{pn}) e massa (m_{pn}) conhecidos (20 cm³ e 55,157 g). O penetrômetro foi submetido a vácuo e posteriormente preenchido com mercúrio por meio do aumento da pressão, até que o volume acumulado intrudido por massa (cm³/g), medido pelo equipamento, se tornasse constante. Para ambas as biomassas a pressão variou de 13,8 kPa a 34536 kPa.

A massa final do conjunto foi então devidamente registrada (m_f). A massa de mercúrio adicionada à célula (m_{Hg}) foi calculada como a diferença entre a massa total e as massas do aparato experimental e da amostra, conforme Equação.4.14:

$$m_{Hg} = m_f - m_{pn} - m_a \quad (4.14)$$

A massa de Hg que ocuparia o mesmo volume que a amostra ($m_{Hg,a}$) é calculada subtraindo-se a massa de Hg que ocupa o penetrômetro vazio ($m_{Hg,pv}$) da massa total de Hg

adicionada à célula (Equação 4.15). A massa de Hg que ocupa a célula vazia foi determinada realizando-se o teste sem a biomassa.

$$m_{Hg_a} = m_{Hg,pv} - m_{Hg} \quad (4.15)$$

Sabendo a massa específica do mercúrio ($\rho_{Hg} = 13600 \text{ kg/m}^3$), obtêm-se o volume ocupado pela partícula no penetrômetro (V_a) como:

$$V_a = \frac{m_{Hg,a}}{\rho_{Hg}} \quad (4.16)$$

A massa específica aparente do material (ρ_{ap}) foi obtida pela relação entre a massa utilizada (m_a) e o volume de amostra determinado pelo experimento (V_a):

$$\rho_{ap} = \frac{m_a}{V_a} \quad (4.17)$$

Esta massa específica é chamada de aparente porque o mercúrio não consegue penetrar nos poros presentes no material, de forma que o volume calculado é maior do que o real porque considera vazios presentes na estrutura do sólido que não foram penetrados pelo mercúrio. Ressalta-se que, por conta de limitações do equipamento, foi analisado um pedaço de palha de milho de área superficial de cerca de 1 cm^2 . O ensaio foi feito apenas uma vez devido aos custos da análise.

A massa específica da areia foi determinada Santos (1997) por um picnômetro utilizando água como fluido. O volume do material foi obtido a partir do volume deslocado de fluido após a adição de uma quantidade conhecida de material dentro do instrumento. Neste caso, o ensaio foi feito em triplicata.

Os resultados obtidos da massa específica aparente (ρ_{ap}) estão dispostos na Tabela 4.6, na qual também de se encontram a massa (m_a) e o volume (V_a) da amostra analisada. Observou-se que a palha de milho tem uma massa específica aparente 22,7% menor que a massa específica da areia.

Tabela 4.6 Massa específica aparente dos materiais

Material	m_a (g)	V_a (cm ³)	ρ_{ap} (g/cm ³)
Areia ¹	2,00	$7,59 \cdot 10^{-1}$	$2,636 \pm 0,116$
Palha de Milho	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$1,10 \cdot 10^{-1}$	$9,36 \cdot 10^{-1}$

¹Valores retirados de Santos (1997)

4.8. Estudo dos Parâmetros Fluidodinâmicos para Partículas Homogêneas

4.8.1. Velocidade Mínima de Fluidização

Como discutido no item 3.5, vários autores observaram que as biomassas apresentam uma fluidização de má qualidade ou simplesmente não fluidizam quando adicionadas sozinhas no leito. Todavia, as terminologias aplicadas em estudos fluidodinâmicos consideraram a velocidade mínima de fluidização como uma característica determinante para a classificação das partículas. Esta velocidade foi então calculada por meio de correlações da literatura para que a classificação terminológica pudesse ser devidamente realizada.

As correlações utilizadas estão dispostas na Tabela 4.7, que traz a faixa de trabalho de cada autor com relação a diâmetro de partícula, massa específica e esfericidade, bem como a correlação proposta.

Tabela 4.7 Correlações para o cálculo de U_{mf} de partículas homogêneas

Autores	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	φ (-)	Equação	
Thonglimp, et al. (1984a)	0,113 - 2,125	1607-7425	0,9-1,0	$Re_{mf} = (31,60^2 + 0,0425Ar)^{0,5} - 31,60$	(4.18)
Nakamura et al. (1985)	0,2- 4,0	-	-	$Re_{mf} = (33,95^2 + 0,0465Ar)^{0,5} - 33,95$	(4.19)
Adánez e Abanades (1991)	0,4 - 3,2	1600-2600	-	$Re_{mf} = (25,18^2 + 0,0373Ar)^{0,5} - 25,18$	(4.20)

Os autores Thonglimp et al. (1984a), Nakamura et al. (1985) e Adánez e Abanades (1991) foram escolhidos a partir da análise de todos as citações da revisão de Anantharaman et al. (2018) sobre o assunto. Os primeiros dois grupos de autores foram selecionados porque as partículas de biomassa e areia deste trabalho apresentavam diâmetro médio dentro da faixa de estudo, a qual é entre 0,113 mm e 2,125 mm para Thonglimp et al. (1984a) e entre 0,200 e 4,000 mm para Nakamura et al. (1985).

Nenhuma outra correlação apresentava faixas de trabalho adequadas para as partículas deste trabalho, então a correlação de Adánez e Abanades (1991) foi selecionada como referência por apresentar uma faixa de diâmetros (entre 0,4 e 3,2 mm) contendo dois (0,496 mm e 0,962 mm) dos três diâmetros trabalhados (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 Propriedades das partículas e parâmetros fluidodinâmicos teóricos

Material	\bar{d}_p (mm)	ρ_{ap} (kg/m ³)	ϕ (-)	U_{mf} (m/s)			U_t (m/s)	ε_{mf} (-)
				Thonglimp et al. (1984a)	Nakamura et al. (1985)	Adáñez e Abanades (1991)		
Areia	0,335	2636	0,85 ²	0,102	0,104	0,111	2,46	0,42
Palha de Milho	0,253	936	0,32 ¹	0,021	0,022	0,023	0,43	0,75
	0,496		0,18 ¹	0,079	0,081	0,086	0,53	0,90
	0,962		0,19 ¹	0,248	0,255	0,258	0,79	0,88

¹ Esfericidade obtida pelo método de Wadell (1935); ² Esfericidade obtida pelo método de Riley (1941)

Verifica-se que as velocidades mínimas de fluidização calculadas pelas diferentes correlações empíricas apresentaram boa concordância entre si. A maior incerteza percentual observada para a palha de milho foi de 3,84% para o menor tamanho ($\bar{d}_p = 0,253$ mm). As velocidades calculadas para a areia apresentaram uma incerteza percentual de 3,35%. Estes desvios são pequenos ao se levar em consideração que cada correlação foi obtida em diferentes condições, assim pode-se concluir que os valores são aceitáveis.

4.8.2. Velocidade Terminal das Partículas

A velocidade terminal da partícula (U_t) foi determinada a partir da Equação de Haider e Levenspiel (1989) – Equação 4.21 – e os resultados estão apresentados na Tabela 4.8.

$$U_t = \left[\frac{4d_p(\rho_p - \rho)g}{3\rho C_D} \right]^{1/2} \quad (4.21)$$

na qual, C_D é o coeficiente de arraste, calculado pela Equação 4.22:

$$C_D = \frac{24}{Re_t} \left[1 + (8,1716e^{-4,0655\phi_p}) Re_t^{0,0964+0,5565\phi_p} \right] + \frac{73,69(e^{-5,0748\phi_p}) Re_t}{Re_t + 5,378e^{6,2122\phi_p}} \quad (4.22)$$

A velocidade terminal permitiu estimar a o limite de velocidade superficial do gás a qual poderia ocorrer a elutriação das partículas considerando suas propriedades físicas. Observou-se que a areia possui uma elevada velocidade terminal (2,46 m/s), entre 3,11 e 5,72 vezes maior que as velocidades terminais da biomassa, quando considerado o maior ($\bar{d}_p = 0,962$ mm) e o menor diâmetro médio ($\bar{d}_p = 0,253$ mm), respectivamente. Por conta disso, verificou-se que a areia não sofreria elutriação na faixa de velocidade trabalhada.

Os ensaios preliminares com a mistura de areia e o maior tamanho de palha de milho ($\bar{d}_p = 0,962$ mm) foram realizados para se definir a faixa de velocidade de gás para todos os experimentos. Os ensaios indicaram que uma faixa de velocidade entre 0 e 0,874 m/s seria o mais adequado para se observar os diferentes estados fluidodinâmicos. Assim, esta faixa foi selecionada para os ensaios. Entretanto, observando os resultados das velocidades terminais das biomassas (Tabela 4.8), verifica-se que as partículas podem começar a elutriar em velocidades menores que 0,874 m/s. Com efeito, diferentes procedimentos foram adotados para que se garantisse que grande parte do ensaio fosse feito com uma quantidade constante de material dentro do leito.

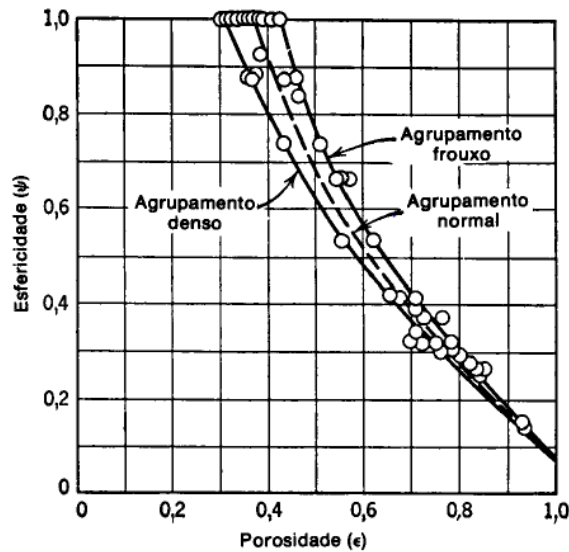
Observou-se uma elutriação entre 12-17% para a mistura entre areia e o menor tamanho de palha de milho, menor que 10% para a mistura do inerte com o tamanho intermediário de biomassa e menor que 2% para a mistura com o tamanho maior. Esta variação na massa, todavia, afetou apenas vazões acima da velocidade de fluidização completa das misturas, de forma a não influenciar os resultados obtidos quanto à identificação das velocidades características e dos estados fluidodinâmicos.

4.8.3. Porosidade do Leito

A porosidade do leito do leito fixo foi identificada a partir da Figura 4.11 extraída de Foust et al. (1982). As esfericidades consideradas foram as obtidas pelo método de Wadell (1935) para a biomassa e de Riley (1941) para a areia. A curva de agrupamento normal foi considerada devido à natureza dos materiais. Os valores obtidos estão dispostos na Tabela 4.8.

Considerando as mesmas condições para a porosidade do leito na mínima fluidização, verificou-se que os valores calculados para as biomassas, considerando um sistema homogêneo, são elevados (acima de 0,5), devido à baixa esfericidade apresentada pelos materiais, que torna a acomodação das partículas dentro do equipamento com significativo espaçamento entre elas. A areia, por sua vez, apresentou porosidade de 0,42, menor do que as biomassas, pois sua maior esfericidade leva a leitos mais empacotados e com menos espaços vazios.

Figura 4.11 Esfericidade em função da porosidade do leito considerando partículas uniformes



Fonte: Foust et al. (1982)

4.9. Aparato Experimental

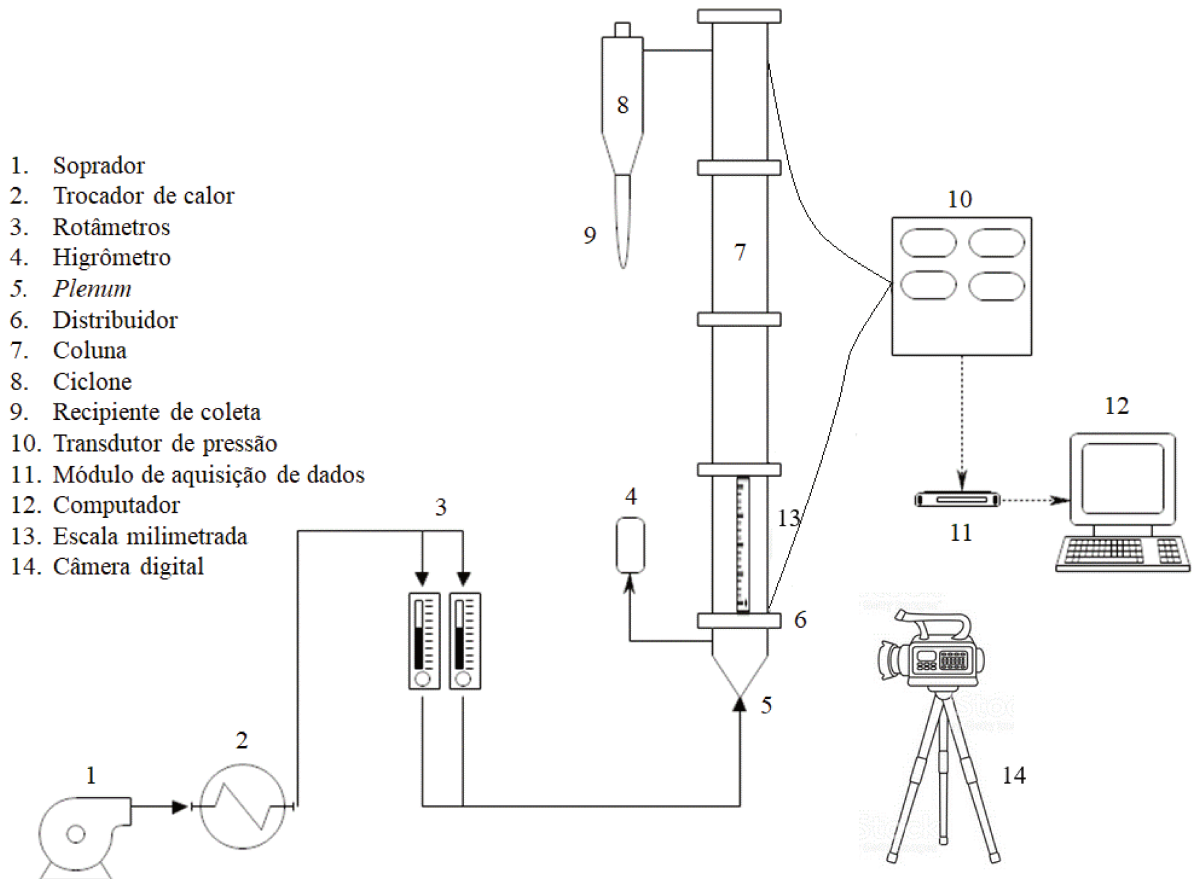
Para avaliar o comportamento fluidodinâmico da mistura de biomassa com material inerte (areia) foi utilizado um leito de acrílico em escala de laboratório, com diâmetro médio de 0,092 m e altura de 2 m, alimentado por ar comprimido proveniente de um soprador. A Figura 4.12 apresenta um esquema do equipamento.

Para o suprimento de ar comprimido foi utilizado um soprador radial, com potência máxima de 7,5 CV. O resfriamento do ar de entrada foi feito por um trocador de calor tipo placa e tubo, tendo água como fluido refrigerante. A vazão de ar foi medida por rotâmetros nas faixas de vazão de 0 a 10 m³/h e de 10 a 100 m³/h. O fluido entra no leito por meio de uma placa perfurada com fração de área livre de 5,89%.

Um ciclone do tipo *Lapple* com diâmetro interno de 0,10 m e um filtro de tecido (algodão) foram acoplados na saída da coluna a fim de reter o material particulado. As medidas de temperatura e umidade no interior do leito foram obtidas através de um termo-higrômetro digital.

As medidas de queda de pressão foram realizadas por meio de um transdutor de pressão diferencial do tipo membrana (faixa de operação: 0-12,454 kPa, 1% de precisão), conectado logo acima da placa distribuidora e no topo da coluna. O transdutor transmite sinais de voltagem para um módulo de aquisição de dados, que armazena os sinais de voltagem a uma frequência de 200 Hz. Os sinais são depois convertidos novamente da queda de pressão por meio do procedimento descrito no Anexo B deste trabalho (item 10).

Figura 4.12 Esquema do aparato experimental utilizado nos ensaios fluidodinâmicos



4.10. Procedimento Experimental

Para a análise fluidodinâmica foi feita a mistura de 800 g de material inerte (areia) com diferentes massas de palha de milho, de acordo com a razão de fração mássica desejada. As quantidades adicionadas foram 20 g, 40 g, 60 g, 80 g, e 100 g, as quais correspondem a razões de fração mássica de biomassa e inerte entre 2,5 m-%, 5,0 m-%, 7,5 m-%, 10,0 m-% e 12,5 m-%, respectivamente. As misturas foram previamente realizadas em um béquer com uma espátula para depois ser versada dentro do leito, a fim de garantir que o ensaio começasse com um leito completamente misturado.

A partir desta situação, o leito foi devidamente fechado e a vazão de gás (ar atmosférico) foi aplicada para as vazões máximas de 13 m³/h para o menor diâmetro de biomassa e 20 m³/h para os demais diâmetros. Após a realização da coleta de dados, a vazão foi diminuída para o próximo valor desejado e uma nova coleta foi feita, até atingir a vazão nula.

Para cada vazão, o leito foi mantido em-suspensão por 2 min e os dados de queda de pressão registrados a uma frequência de 200 Hz. O primeiro minuto de registro foi mantido apenas para garantir a estabilidade do leito, e o segundo minuto foi utilizado na análise de dados. Os ensaios apenas com o inerte (areia) foram realizados com 800 g de material no leito, aplicando uma vazão de gás descendente entre 0 e 20 m³/h.

Após atingir a estabilidade, também foram medidas as alturas máxima e mínima atingidas pelo leito por meio de uma escala milimétrica fixada na parte exterior da coluna. A fim de complementar as análises, observações visuais foram feitas mediante registros em vídeo do experimento (Canon, PowerShot SX30 IS, Estados Unidos).

4.11. Metodologias para Tratamento de Dados

Método 1: Queda de Pressão Total

A partir da pressão instantânea entre dois pontos obtida no ensaio fluidodinâmico, a queda de pressão total média ($\Delta\bar{P}$), correspondente a cada vazão, foi calculada conforme Equação 4.23.

$$\Delta\bar{P} = \frac{\sum_{i=0}^{i=N} \Delta P_i}{N} \quad (4.23)$$

na qual, ΔP_i é um registro da pressão instantânea e N é o número de registros de ΔP_i obtidos para cada vazão medida (11945 pontos). Gráficos foram elaborados da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás (Exemplo – Figura 4.13a).

Método 2: Desvio Padrão das Flutuações de Pressão

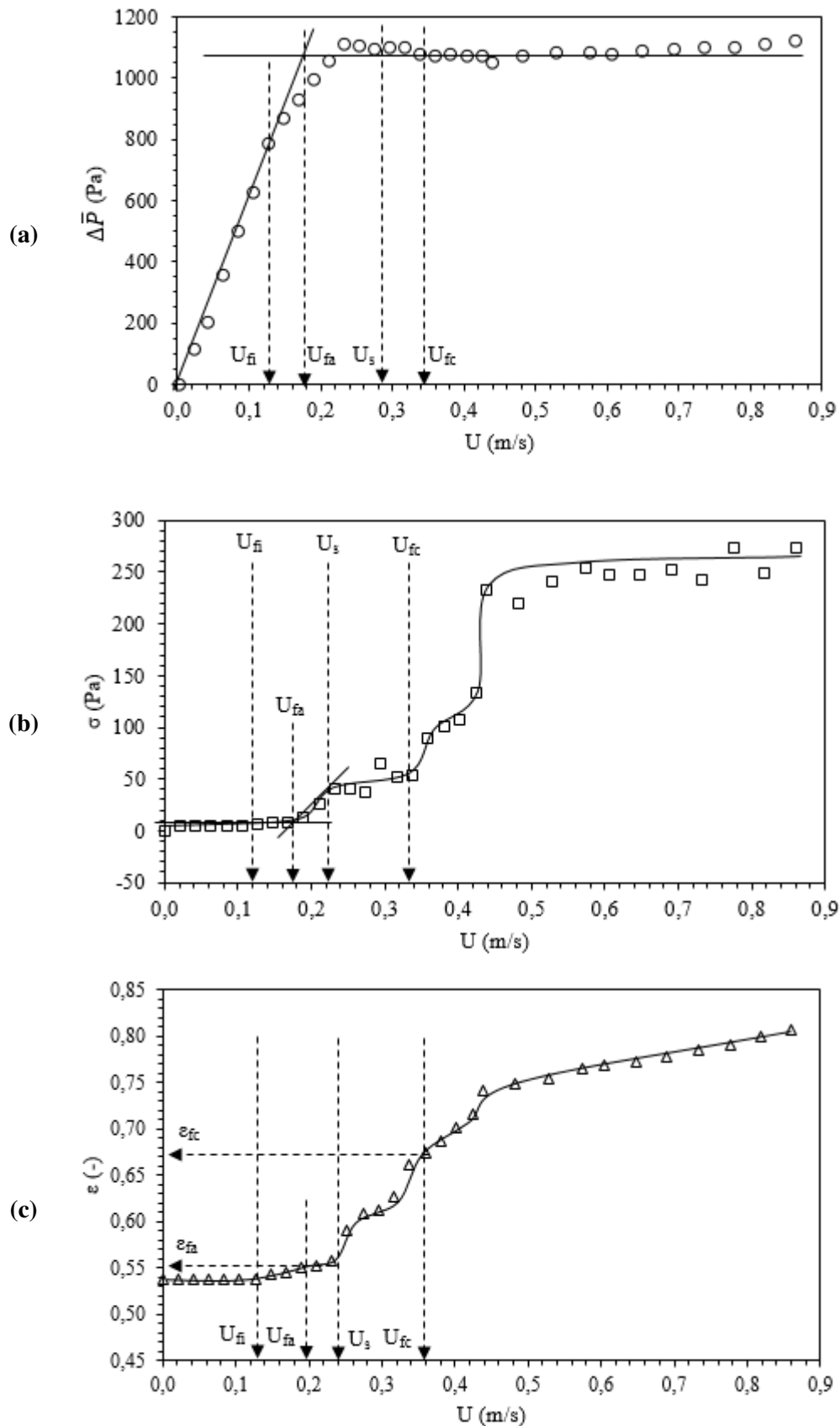
O desvio padrão das flutuações de pressão no leito foi calculado pela Equação 4.24:

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=0}^{i=N} (\Delta P_i - \Delta\bar{P})^2}{N - 1} \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

na qual ΔP_i é um registro da pressão instantânea mensurada entre dois pontos em cada tempo, $\Delta\bar{P}$ é a média destas pressões em cada velocidade e N o número de pontos (11945).

Analogamente ao Método 1, curvas do desvio padrão em função da velocidade superficial do gás foram construídas (Exemplo – Figura 4.13b).

Figura 4.13 Exemplo de identificação dos parâmetros fluidodinâmicos da mistura binária (palha de milho/ areia: $\bar{d}_p = 0,496 \text{ mm}/ 0,335 \text{ mm}$; $\chi = 7,5 \text{ m-\%}$)



Método 3: Expansão do Leito

A expansão do leito é definida como a relação entre o volume de vazios em seu interior e a volume total da mistura de biomassa e inerte, calculada para cada velocidade superficial do gás, de acordo com a Equação 4.25 (TANNOUS e MIZONOV, 2009):

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{A_c H} \left(\frac{m_b}{\rho_{p,b}} + \frac{m_i}{\rho_{p,i}} \right) \quad (4.25)$$

na qual,

A_c - área da seção transversal da coluna;

m_b e m_i - massas de biomassa e inerte, respectivamente;

$\rho_{p,b}$ e $\rho_{p,i}$ - massas específicas aparente da biomassa e inerte, respectivamente;

H - altura média alcançada pelo leito

A altura média (H) foi determinada por meio da média aritmética entre as alturas mínimas e máximas do leito. Os dados da expansão do leito também foram analisados por meio da construção de gráficos deste parâmetro em função da velocidade superficial do gás (Exemplo – Figura 4.13c).

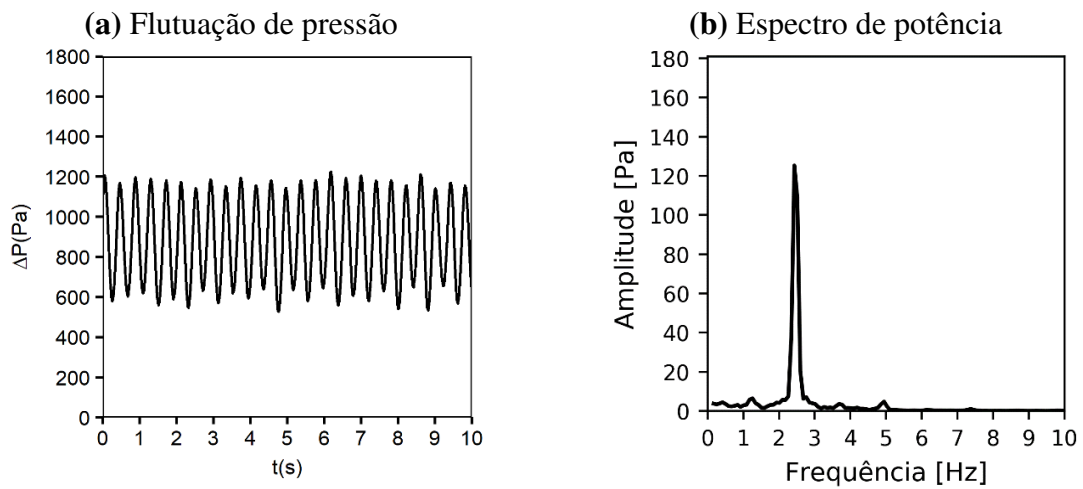
Método 4: Flutuação de Pressão

A análise da flutuação de pressão (Figura 4.14a) foi feita a partir das medidas de queda de pressão instantânea entre dois pontos no leito, sendo um a 7,5 mm do distribuidor e outro no topo da coluna, a 50 mm da saída do gás. Como mencionado anteriormente (item 4.10), a taxa de amostragem das medidas foi de 200 Hz e a coleta foi realizada por 1 min para cada vazão de gás, após estabilização de 1 min.

Para garantir a construção de gráficos mais adequados a avaliação, foi feito um recorte de 10 s nas medidas, resultando em imagens com 2000 pontos de queda de pressão. Um exemplo destas imagens pode ser visto na Figura 4.14a, obtida para a areia em $U = 0,380$ m/s.

Figura 4.14 Exemplo da flutuação de pressão (a) e espectro de potência (b)

Ensaio: areia, $U = 0,380$ m/s



étodo 5: Espectro de potência por Transformada Discreta de Fourier (TDF)

Os sinais de flutuação da queda de pressão foram tratados por meio da transformada discreta de Fourier, a fim de se obter espectros de potência que permitissem a avaliação da variação destes sinais no domínio da frequência. A aplicação da transformada discreta de Fourier aos sinais de pressão e a confecção dos espectros de potência de forma gráfica foram automatizadas mediante o uso de um programa de computador desenvolvido na linguagem Python, versão 3.7.1 (ROSSUM, 2019) utilizando a biblioteca Numpy (OLIPHANT, 2019).

A transformada de Fourier basicamente decompõe o sinal de queda de pressão em senoides de diferentes frequências e computa a amplitude atingida por cada frequência. Para diminuir a variância do espectro de potência e garantir uma boa resolução, foi aplicado o método de Welch (WELCH, 1967 *apud* JOHNSSON et al, 2000), o qual considera o espectro como uma média de subespectros obtidos a partir da divisão dos pontos de pressão instantâneos em intervalos de tempo iguais.

Assim, para cada velocidade superficial de gás estudada, foram obtidos N sinais de flutuação de pressão em função do tempo, $\Delta P_i(t)$, a uma frequência de amostragem chamada de f_s . Os sinais foram divididos em S subespectros com L pontos de flutuação de pressão em cada um deles. No caso analisado nesta dissertação, foram considerados os

seguintes dados experimentais: $N = 11945$ pontos, $f_s = 200$ Hz, $S = 5$ subespectros, e $L = 2389$ pontos.

Considerando que cada sinal $\Delta P_i(t)$ esteja igualmente espaçado à uma distância Δt , que é o período de amostragem ($0,005 \text{ s} = 1/f_s$), o sinal pode ser reescrito conforme a Equação 4.26:

$$\Delta P_n = \Delta P(n\Delta t) \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots, L - 1 \quad (4.26)$$

Ressalta-se que Δt foi selecionado de forma a produzir uma frequência de Nyquist suficientemente alta para o desenvolvimento da análise. O critério da frequência de Nyquist diz que o resultado obtido na reconstrução do sinal não pode ter frequências maiores que metade da frequência de amostragem. Como a frequência de amostragem é de 200 Hz, a frequência de Nyquist é de 100 Hz, mais do que suficiente para a observação das frequências associadas ao borbulhamento e movimento do leite. Conforme Johnsson et al. (2000), Sasic et al. (2007) e He et al. (2014), os fenômenos de fluidização ocorrem, em geral, entre 0 e 10 Hz, assim uma frequência de 100 Hz é suficiente para a análise.

O subespectro de potência obtido pela aplicação da transformada discreta de Fourier aos sinais considerando uma frequência arbitrária f_k é descrito pela Equação 4.27:

$$\Delta P^s = \sum_{n=0}^{L-1} w(n) \Delta P_n \exp(-j2\pi f_k n \Delta t) \quad (4.27)$$

na qual $w(n)$ é a função janela de Hanning, utilizada para normalizar os dados conforme sugestão de Lee e Kim (1988), Johnsson et al. (2000) e Felipe (2004). Os valores de frequência selecionados obedecem a Equação 4.28:

$$f_k = \frac{k}{L\Delta t} \text{ e } k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (4.28)$$

O cálculo da transformada rápida de Fourier é computado apenas para variáveis independentes não-negativas, variando entre $0 < f_k < f_s/2$. Entretanto, a frequência real varia entre $-f_s/2 < f_k < f_s$, ou seja, esta tem um componente negativo que também deve ser considerado no cálculo de sua amplitude. Devido à sua propriedade de simetria, essa consideração foi computada multiplicando o subespectro por 2. Além disso, foi necessário multiplicar por $1/L$ para corrigir efeitos associados a hipótese de que a frequência selecionada é uma frequência de Fourier (BENDAT e PIERSOL, 2010). Assim, a amplitude obtida foi normalizada por $2/L$. O espectro de potência médio foi então calculado pela Equação 4.29:

$$\Delta P(f, T) = \frac{1}{S} \sum_1^S \Delta P^s \quad (4.29)$$

O espectro é apresentado por meio de um gráfico da amplitude do sinal em função da frequência, conforme Figura 4.14b, obtido para a areia na velocidade de 0,380 m/s.

4.12. Definição dos Parâmetros Fluidodinâmicos

Os parâmetros fluidodinâmicos foram definidos a partir da observação de transições na queda de pressão total, desvio padrão das flutuações de pressão e expansão do leito em função da velocidade superficial do gás, além da observação visual do leito.

Para os ensaios apenas com inerte, foi identificada a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}). No caso do método da queda de pressão total (Figura 4.15a), seu valor corresponde a interseção entre a reta que passa pelos pontos de leito fixo e a reta correspondente ao leito completamente fluidizado. Para as metodologias de desvio padrão das flutuações de pressão (Figura 4.15b) e expansão do leito (Figura 4.15c), a U_{mf} foi obtida na primeira inflexão observada na curva partindo-se da origem.

A porosidade de mínima fluidização (ε_{mf}) do inerte, por sua vez, foi definida pelo pela intersecção do leito fixo e fluidizado, pelo método da expansão do leito (Figura 4.15c) associado à velocidade mínima fluidização.

Para os ensaios de misturas binárias, as velocidades características foram identificadas a partir de uma adaptação das observações realizadas por Mourad et al. (1994) e Tannous et al. (1998). As definições adotadas estão descritas na Tabela 4.9 e foram complementadas e sustentadas pelas observações visuais do leito.

Pelo método da expansão do leito, além da identificação das velocidades, também foram definidas as porosidades características de fluidização como:

- ε_{fa} (porosidade do leito aparente): expansão do leito correspondente a U_{fa} ;
- ε_{fc} (porosidade do leito completa): expansão do leito correspondente a U_{fc} .

A título de exemplo, todos os parâmetros podem ser visualizados na Figura 4.13, para a palha de milho ($\bar{d}_p = 0,496$ mm) e razão de fração mássica de biomassa e inerte de 7,5 m-%.

Figura 4.15 Identificação experimental dos parâmetros fluidodinâmicos do material inerte

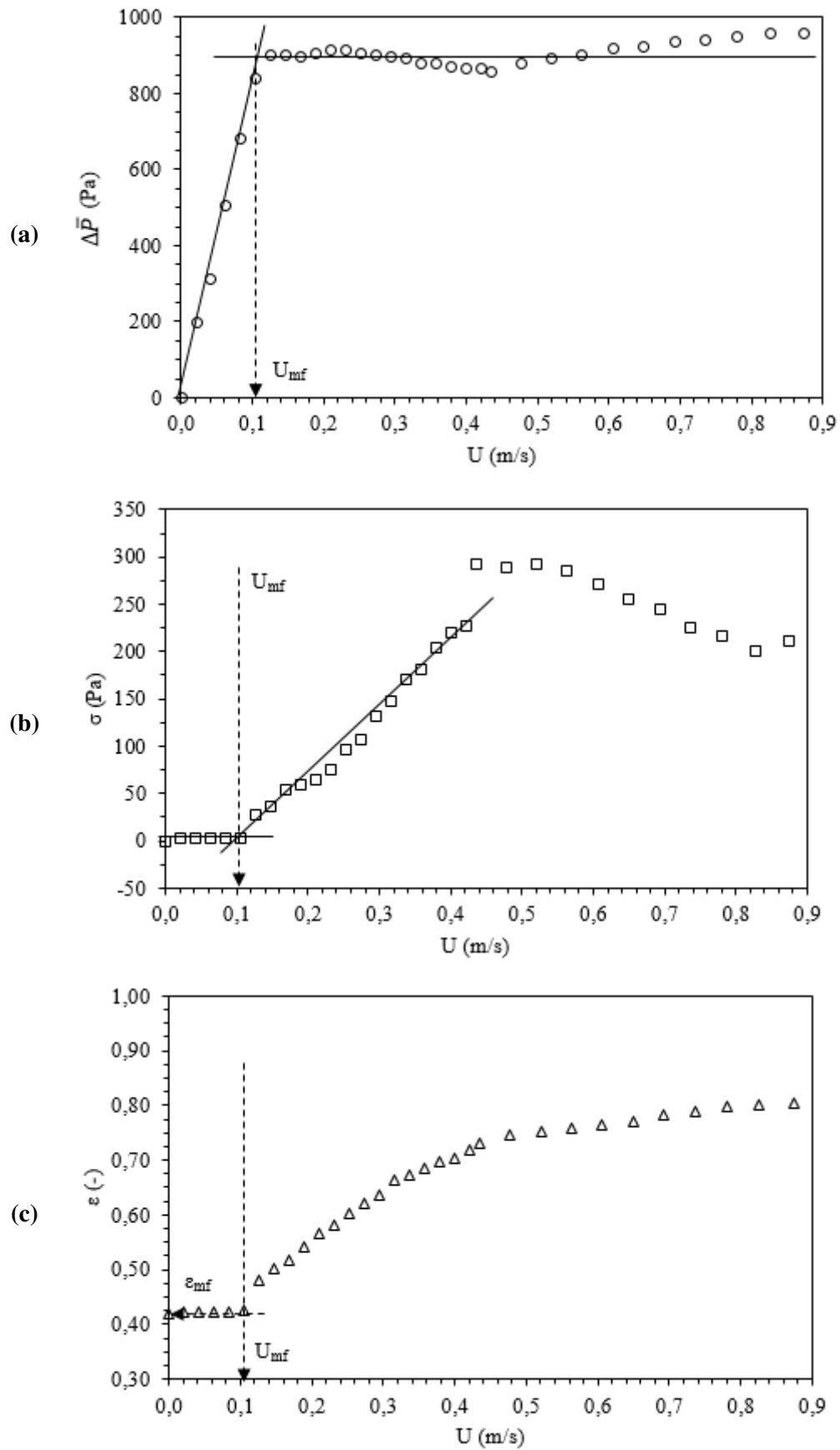


Tabela 4.9 Identificação das velocidades características em cada metodologia

Velocidade	Queda de Pressão Total	Desvio Padrão das Flutuações de Pressão	Expansão do Leito
U_{fi} (velocidade de fluidização inicial)	Ponto onde termina a reta associada ao leito fixo, ou seja, onde a variação de ΔP com a velocidade deixa de ser linear	Ponto de inflexão em que o desvio padrão deixa de ser nulo	Ponto de inflexão em que a porosidade deixa de ser constante
U_{fa} (velocidade de fluidização aparente)	Interseção entre a reta que passa pelos pontos de leito fixo e a reta correspondente ao leito completamente fluidizado (queda de pressão constante)	Ponto de inflexão após U_{fi} em que há mudança brusca de inclinação	Ponto de inflexão após U_{fi} em que há mudança brusca de inclinação
U_s (velocidade de segregação)	Ponto de inflexão entre U_{fa} e U_{fc} no qual ΔP passa a aumentar levemente com a velocidade	Ponto de inflexão entre U_{fa} e U_{fc} no qual se observa a formação de um patamar	Ponto de inflexão entre U_{fa} e U_{fc} no qual se observa a formação de um patamar
U_{fc} (velocidade de fluidização completa)	Ponto a partir do qual a curva se torna praticamente constante	Ponto de inflexão ao final do patamar	Ponto de inflexão ao final do patamar

4.1. Definição das Variáveis Fluidodinâmicas

Para realizar a análise da influência do diâmetro médio dos materiais nos parâmetros fluidodinâmicos, foi considerando como diâmetro de referência a razão entre o diâmetro médio de biomassa ($\bar{d}_{p,b}$) e de inerte ($\bar{d}_{p,i}$), conforme Equação 4.30:

$$D = \frac{\bar{d}_{p,b}}{\bar{d}_{p,i}} \quad (4.30)$$

Para a análise da influência da quantidade de biomassa e inerte, foi considerada como referência a razão entre a fração mássica de biomassa (x_b) e a fração mássica de inerte (x_i) calculada denominada de razão de fração mássica (χ), descrita pela Equação 4.31. As frações são definidas pela massa de biomassa (m_b), massa de inerte (m_i) e massa total de partículas (m_T).

$$\chi [\%] = 100 \times \frac{x_b}{x_i} = 100 \times \frac{m_b / m_T}{m_i / m_T} \quad (4.31)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise dos Resultados Baseada em cada Metodologia Aplicada

5.1.1. Evolução da Queda de Pressão Total

A Figura 5.1 traz um comparativo entre as quedas de pressão de misturas considerando diferentes razões de fração mássica ($2,5 < \chi < 12,5$ m-%) e de diâmetro ($0,76 < D < 2,87$) entre biomassa e inerte, assim como para o material inerte (areia, 0 m-%, $\bar{d}_p = 0,335$ mm).

Primeiramente, avaliando-se a região de leito fixo, verificou-se que a queda de pressão de misturas de menor razão de diâmetro ($D = 0,76$ – Figura 5.1a) ocasionou sempre uma maior queda de pressão em relação ao inerte, por conta da maior massa dentro do leito.

Para as outras duas razões de diâmetro ($D = 1,48$ e $2,87$ – Figuras 5.1b e c, respectivamente), observou-se, entretanto, que a queda de pressão na região de leito fixo foi menor ou igual a da areia, apesar do aumento da massa de material. Nestes casos, a forma de empacotamento do leito pode ter levado a um aumento dos espaços vazios dentro do mesmo, ocasionando a diminuição da queda de pressão observada.

A segunda observação a ser feita é que nas regiões entre o leito fixo e leito completamente fluidizado, diferentes situações foram constatadas. Estas situações serão mais bem avaliadas no item 5.5.2.

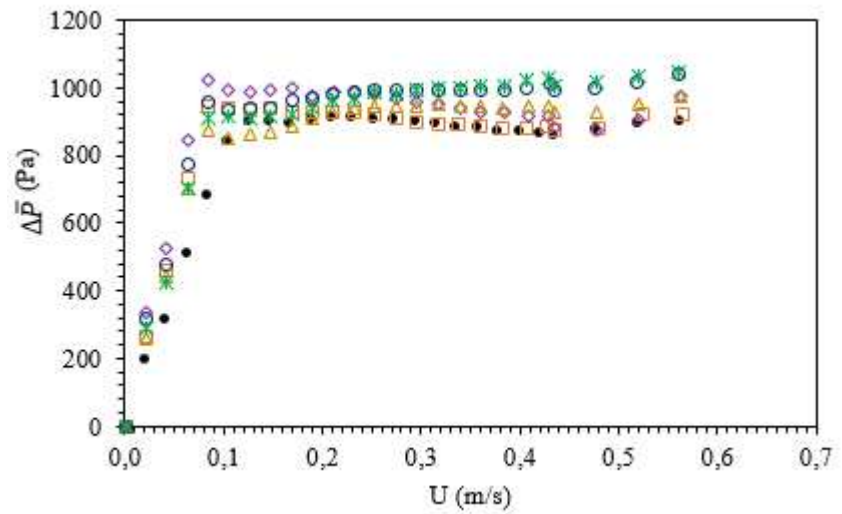
Como terceira observação pode-se verificar que na região de leito fluidizado, acima de U_{fc} , todas as combinações de diâmetro e massa apresentaram o comportamento praticamente constante, sendo que a queda de pressão aumentou com o aumento da massa.

Para velocidades acima de 0,43 m/s para $D = 0,76$ (Figura 5.1a) e 0,55 m/s para as demais razões de diâmetro ($D = 1,48$ e $2,87$ – Figuras 5.1b e c) um ligeiro aumento da queda de pressão foi observado devido à formação de pistões, causada pela elevada razão entre altura do leito e diâmetro da coluna ($1,3 \leq H/D \leq 2,8$), conforme citado por Geldart (1986) para partículas homogêneas e por Oliveira et al. (2013) para misturas binárias de resíduo de tabaco/areia ($D = 1,71$ e $\chi = 15,0$ m-%) e bagaço de sorgo/areia ($D = 1,86$ e $\chi = 15,0$ m-%).

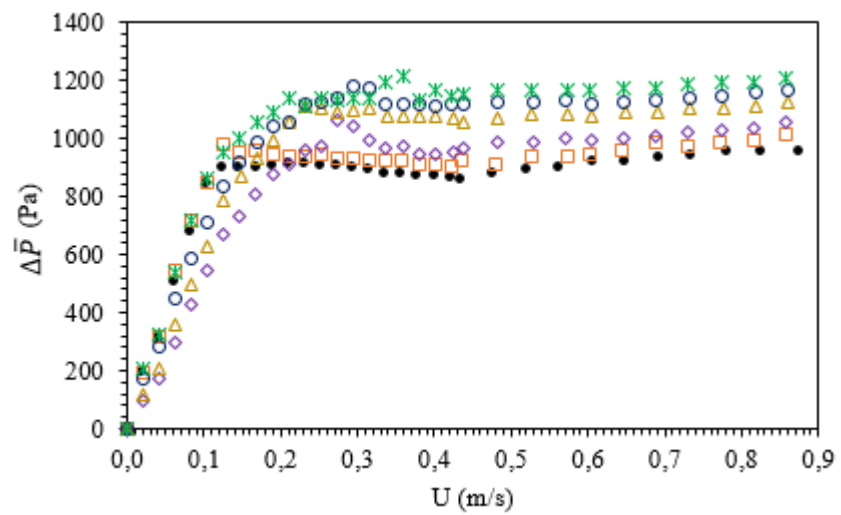
Figura 5.1 Evolução da queda de pressão total em função da velocidade do gás para as diferentes razões de fração mássica e de diâmetro entre biomassa e inerte

• 0,0 m-% □ 2,5 m-% ◇ 5,0 m-% △ 7,5 m-% ○ 10,0 m-% × 12,5 m-%

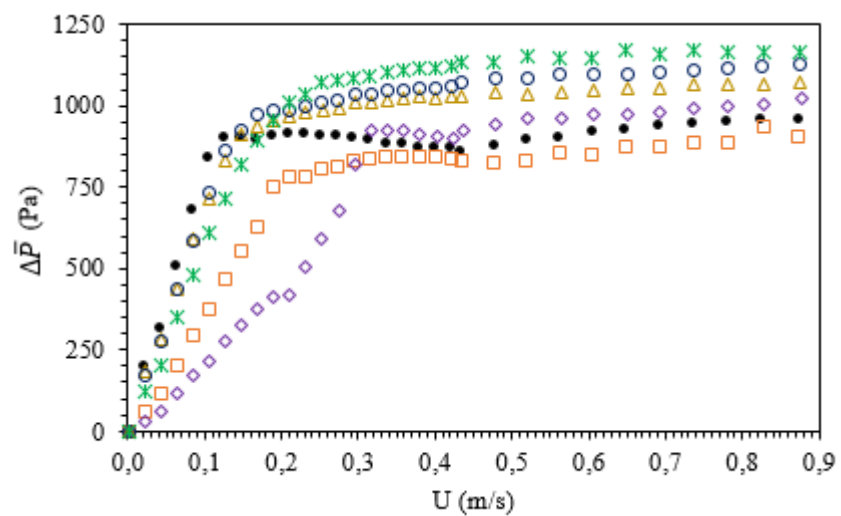
(a) $D = 0,76$



(b) $D = 1,48$



(c) $D = 2,87$



Pode-se comparar a queda de pressão observada na região de fluidização completa e o peso aparente do material por área transversal do leito (queda de pressão teórica) a fim de analisar a fidelidade das medidas. As quedas de pressão de $D = 0,76$, $D = 1,48$ e $D = 2,87$ correspondem a $77 \pm 1\%$, $84 \pm 5\%$ e $81 \pm 7\%$ do valor teórico, respectivamente. Estes resultados são comparáveis com os encontrados por Lourenço (2012), a qual verificou que as quedas de pressão observadas na região de fluidização completa das misturas binárias de eucalipto e endocarpo de tucumã estão entre 72% e 90% do peso aparente do leito.

5.1.2. Evolução do Desvio Padrão das Flutuações de Pressão

A evolução do desvio padrão das flutuações de pressão para as diferentes razões de diâmetro (D) e de fração mássica (χ) entre biomassa e inerte está disposta na Figura 5.2. Assim como para a metodologia da queda de pressão, algumas observações relevantes podem ser feitas a respeito do comportamento da mistura binária. Para todas as combinações de D e χ , a região correspondente ao leito fixo (velocidades menores em 0,1 m/s, em geral), apresentou desvio padrão constante e próximo de zero.

Para velocidades maiores é importante observar que há uma variabilidade na inclinação das curvas entre as diferentes razões de fração mássica, menos aparente para a menor razão de diâmetro (Figura 5.2a) e mais notável para a maior razão de diâmetro (Figura 5.2c).

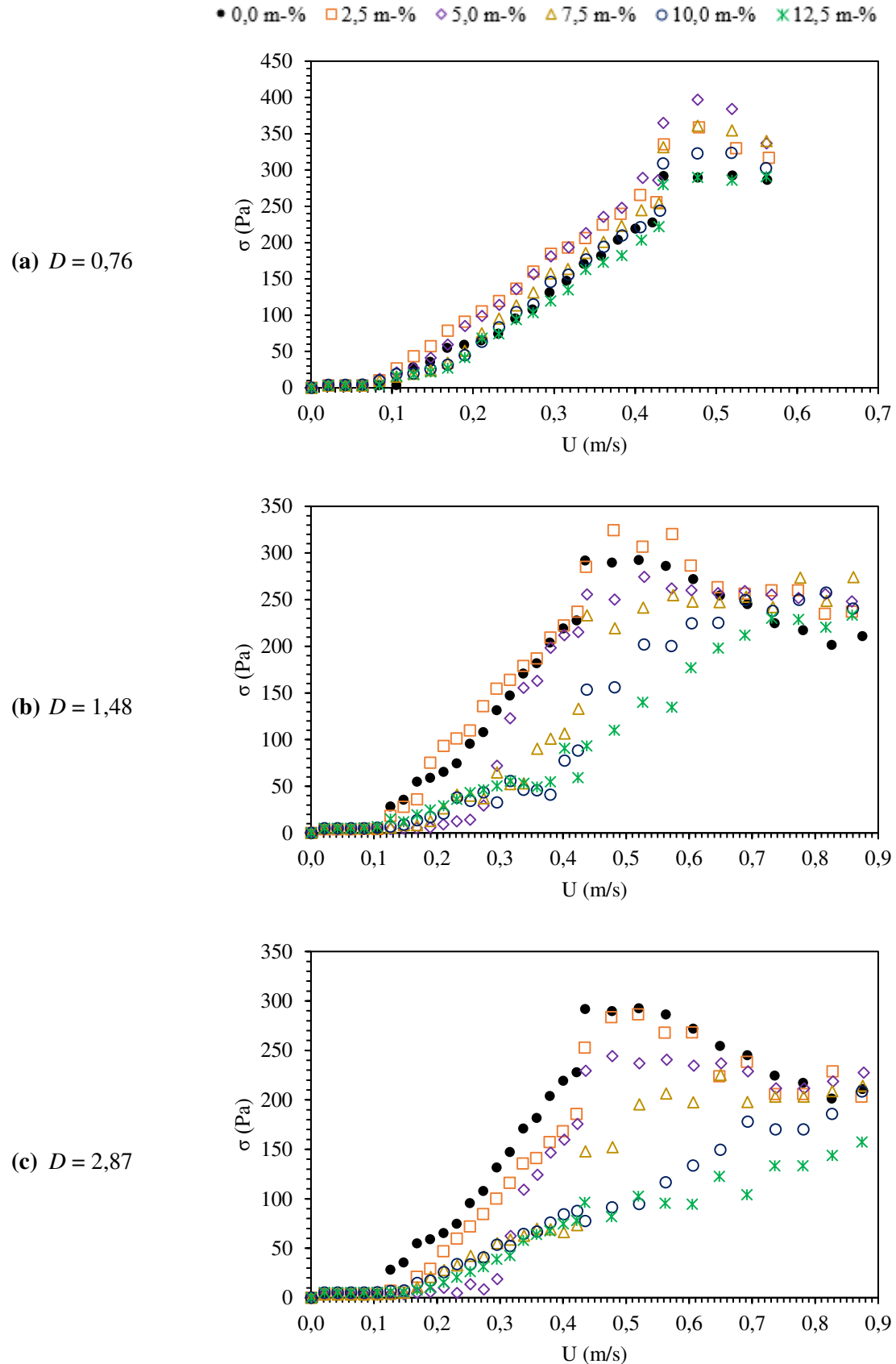
A faixa de variação do desvio padrão considerando um valor mínimo (leito fixo) e máximo (pico da curva) diminuiu com o aumento das razões de diâmetro. Comparando esta variação entre as razões de fração mássica de 2,5 m-% e 12,5 m-%, tem-se:

- Para a menor razão de diâmetro ($D = 0,76$): entre 356 Pa e 288 Pa
- Para a razão de diâmetro intermediário ($D = 1,48$): entre 321 Pa e 234 Pa
- Para a maior razão de diâmetro ($D = 2,87$): entre 282 Pa e 152 Pa

Estas variações estão associadas a diferentes comportamentos do leito, os quais serão mais bem discutidos item 5.5.2.

Tannous e Lourenço (2015) também observaram a redução da faixa de variação da amplitude do desvio padrão com o aumento da razão de fração mássica entre biomassa e inerte, para misturas binárias de eucalipto/areia ($D = 1,5 - 6,0$; $\chi = 5,0 - 20,0$ m-%). A redução foi associada ao aumento do volume de biomassa, o qual dificulta a homogeneização do sistema e causa um bloqueio da passagem de ar, contribuindo para uma menor flutuação da queda de pressão.

Figura 5.2 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade do gás para as diferentes razões de fração mássica e de diâmetro entre biomassa e inerte



5.1.3. Evolução da Expansão do Leito

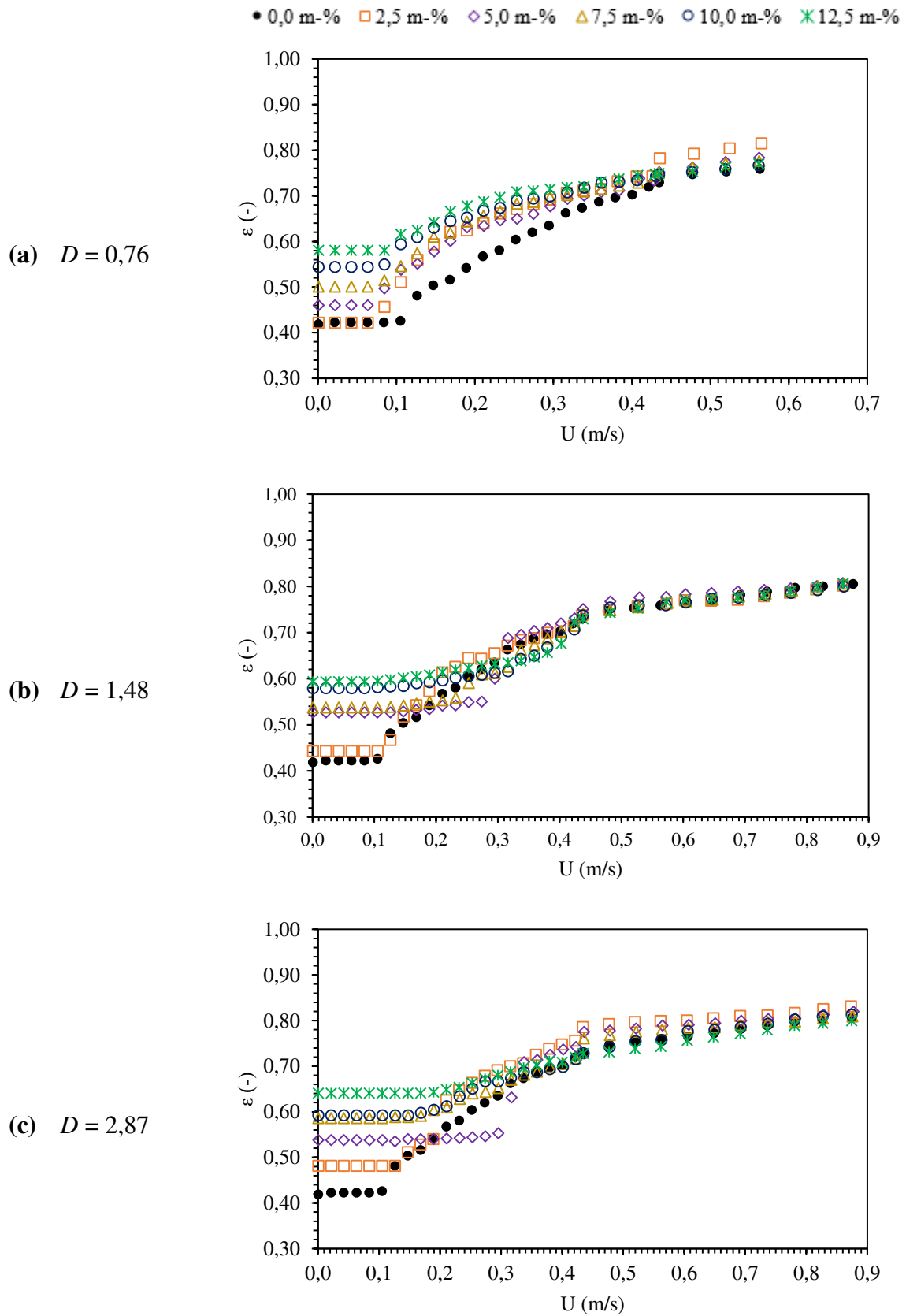
A variação da expansão do leito em função da velocidade superficial do gás para as diferentes razões de diâmetro e de fração mássica entre as partículas estão dispostas na Figura 5.3. A região com velocidade menor que 0,1 m/s apresentou, para a menor razão de diâmetro ($D = 0,76$ – Figura 5.3a), um aumento de 37,67% da porosidade do leito com o aumento da razão de fração mássica entre 2,5 m-% e 12,5 m-%, devido ao aumento da quantidade de material. Para a razão de diâmetro $D = 1,48$ (Figura 5.3b) observou-se que as porosidades entre as razões de 0,0-2,5m%, 5,0-7,5m% e 10,0-12,5m% não apresentaram variações significativas. Para a maior razão de diâmetros ($D = 2,87$ – Figura 5.3c) verificou-se que a porosidade aumentou 33,26% com o aumento da razão de fração mássica, com exceção à razão de 7,5m-% que apresentou porosidade próxima a de 10,0 m-%.

O aumento da porosidade não foi observado por Tannous e Lourenço (2015) nesta mesma região para as misturas de eucalipto e areia com a razão de fração mássica de 5 a 15 m-% e $D = 1,5$, em que a porosidade variou entre 0,41 a 0,48 (aumento de apenas 17,0%). Nesta dissertação a variação observada foi entre 0,44 e 0,60, considerando $D = 1,48$ e razão de fração mássica entre 2,5 e 12,5 m-% (as condições de ensaio mais próximas possíveis as das autoras). Assim, observa-se um aumento de até 20% entre as porosidades verificadas por Tannous e Lourenço (2015) e as dispostas neste trabalho.

Nas regiões para velocidades entre 0,1 m/s e 0,3 m/s foi observada grande variabilidade na expansão do leito considerando não só a diferença entre as razões de fração mássica, mas também entre as razões de diâmetro. Para $D = 0,76$, houve um aumento gradativo da porosidade com o aumento da razão de fração mássica entre 2,5 m-% e 12,5 m-% por conta da boa mistura e adição de massa. Para as demais D , houve uma sobreposição das curvas devido aos diferentes os estados de segregação observados, que serão mais bem discutidos no item 5.5.2.

Na região com $U \geq 0,3$ m/s, para todas as razões de diâmetro, há uma convergência das expansões, independente da razão de fração mássica aplicada, a saber: $D = 0,76$: expansão entre 0,698 e 0,778 para $0,315 \text{ m/s} < U < 0,563 \text{ m/s}$; $D = 1,48$: expansão entre 0,699 e 0,804 para $0,400 \text{ m/s} < U < 0,875 \text{ m/s}$; $D = 2,87$: expansão entre 0,779 e 0,800 para $0,606 \text{ m/s} < U < 0,875 \text{ m/s}$, respectivamente. Este fato ocorreu porque nesta situação todos os arranjos biomassa/inerte encontravam-se bem misturados e completamente fluidizados, de maneira a expandirem de forma similar. Isso corrobora com o trabalho de Tannous e Lourenço (2015).

Figura 5.3 Evolução da expansão do leito em função da velocidade do gás para as diferentes razões de fração mássica e de diâmetro entre biomassa e inerte



5.2. Parâmetros Fluidodinâmicos Experimentais do Material Inerte

Neste item confrontam-se os parâmetros fluidodinâmicos experimentais e calculados pelas correlações empíricas para o inerte. As velocidades mínimas de fluidização (U_{mf}) da areia, identificada a partir dos métodos da queda de pressão total, desvio padrão das flutuações de pressão e expansão do leito estão dispostas na Tabela 5.1, bem como a porosidade mínima de fluidização (ε_{mf}). A título de comparação, também se encontram os valores da literatura.

Tabela 5.1 Parâmetros fluidodinâmicos do inerte na condição de mínima fluidização

Material	\bar{d}_p (mm)	U_{mf} experimental (m/s)			U_{mf} teórico (m/s)		
		Queda de pressão	Desvio padrão	Expansão do leito	Thonglimp et al. (1984a)	Nakamura et al. (1985)	Adánez e Abanades (1991)
		0,110	0,104	0,106	0,102	0,104	0,111
Areia	0,335	ε_{mf} (-)					
		Expansão do leito			Teórico		
		0,426			0,42		

Os resultados experimentais de U_{mf} identificados pelos diferentes métodos apresentam um valor médio de $0,107 \pm 0,003$ m/s. A incerteza percentual observada entre as medidas foi de 2,08%. Pode-se dizer então que há uma concordância entre as metodologias utilizadas.

Os resultados experimentais também podem ser comparados com aqueles calculados por meio das correlações empíricas da literatura. As equações propostas por Thonglimp et al. (1984a) e Nakamura et al. (1985) apresentaram maior concordância com os resultados obtidos pelos métodos do desvio padrão e expansão do leito, apesar dos autores aplicarem o método da queda de pressão total em suas análises. O erro relativo obtido foi de 7,30% e 5,44%, respectivamente. A correlação proposta por Adánez e Abanades (1991) apresentou maior concordância com a metodologia de queda de pressão total, pois apresentou erro relativo de apenas 0,87%.

A porosidade mínima de fluidização (ε_{mf}) de 0,426 foi praticamente igual a identificada na literatura (FOUST et al., 1982) de 0,42, com um erro relativo de 1,41%. A porosidade é uma consequência da alta esfericidade do material (0,85), que torna o acomodamento das partículas dentro do leito mais favorável a um arranjo compacto e com poucos espaços vazios.

5.3. Parâmetros Fluidodinâmicos Experimentais das Misturas Binárias

5.3.1. Velocidades Características de Fluidização

As velocidades de fluidização inicial (U_{fi}), de fluidização aparente (U_{fa}), de segregação (U_s) e de fluidização completa (U_{fc}), determinadas para a mistura binária entre inerte e palha de milho estão apresentadas na Tabela 5.2. Todos os parâmetros foram avaliados em relação as razões de diâmetro médio ($D = 0,76, 1,48$ e $2,87$) e razão de fração mássica ($\chi = 2,5\text{m-}\%, 5,0\text{ m-}\%, 7,5\text{ m-}\%, 10,0\text{ m-}\%$ e $12,5\text{m-}\%$).

Ressalta-se que foi calculada a média das velocidades identificadas pelas três metodologias consideradas (queda de pressão total, desvio padrão das flutuações de pressão e expansão do leito), pois os valores apresentaram boa concordância entre si, com desvio padrão máximo de 0,044 para a U_s da razão de diâmetros $D = 1,48$ e $\chi = 7,5\text{ m-}\%$. Estes resultados estão de acordo com Tannous e Lourenço (2015), para análise entre as misturas de eucalipto e tucumã com areia, com desvio padrão máximo de 0,05 aplicando somente os dois primeiros métodos.

Tabela 5.2 Parâmetros fluidodinâmicos experimentais da mistura de palha de milho e areia

D (-)	χ (m-%)	U_{fi} (m/s)	U_{fa} (m/s)	U_s (m/s)	U_{fc} (m/s)	ε_{fa} (-)	ε_{fc} (-)
0,76	2,5	0,079 ± 0,005	0,079 ± 0,005	-	0,080 ± 0,007	0,424	0,613
	5,0	0,068 ± 0,006	0,068 ± 0,006	0,115 ± 0,004	0,117 ± 0,012	0,460	0,621
	7,5	0,079 ± 0,010	0,079 ± 0,010	0,143 ± 0,007	0,241 ± 0,020	0,501	0,683
	10,0	0,081 ± 0,005	0,081 ± 0,005	0,142 ± 0,008	0,241 ± 0,020	0,544	0,689
	12,5	0,088 ± 0,003	0,088 ± 0,003	0,165 ± 0,007	0,254 ± 0,002	0,581	0,708
1,48	2,5	0,111 ± 0,004	0,111 ± 0,004	0,193 ± 0,020	0,233 ± 0,029	0,443	0,640
	5,0	0,142 ± 0,011	0,219 ± 0,032	0,287 ± 0,044	0,340 ± 0,023	0,540	0,682
	7,5	0,127 ± 0,003	0,183 ± 0,006	0,228 ± 0,008	0,347 ± 0,008	0,550	0,672
	10,0	0,115 ± 0,009	0,169 ± 0,001	0,288 ± 0,029	0,387 ± 0,040	0,593	0,719
	12,5	0,102 ± 0,006	0,139 ± 0,009	0,322 ± 0,021	0,423 ± 0,021	0,602	0,726
2,87	2,5	0,117 ± 0,008	0,136 ± 0,023	0,203 ± 0,023	0,333 ± 0,008	0,515	0,707
	5,0	0,155 ± 0,022	0,187 ± 0,006	0,283 ± 0,008	0,349 ± 0,018	0,540	0,709
	7,5	0,117 ± 0,006	0,157 ± 0,006	0,271 ± 0,019	0,403 ± 0,038	0,588	0,721
	10,0	0,137 ± 0,012	0,164 ± 0,018	0,279 ± 0,014	0,444 ± 0,031	0,598	0,723
	12,5	0,152 ± 0,008	0,187 ± 0,012	0,336 ± 0,038	0,448 ± 0,032	0,641	0,728

5.3.2. Influência da Razão de Diâmetro

Para melhor visualização da influência da razão de diâmetro sobre os parâmetros fluidodinâmicos, foram construídos gráficos comparativos das velocidades características U_{fi} , U_{fa} , U_s e U_{fc} considerando um valor fixo de razão de fração mássica entre biomassa e inerte (Figura 5.4).

Com relação a velocidade de fluidização inicial (U_{fi}), verifica-se na Figura 5.4a que para as menores razões de fração mássica (entre 2,5 e 7,5 m-%), houve aumento de até 109% entre $D = 0,48$ e $D = 1,48$, ao passo que para $D > 1,48$ a velocidade permaneceu praticamente constante. Para as maiores razões de fração mássica, de 10,0 e 12,5 m-%, a velocidade aumentou com o diâmetro 69,1% e 72,7%, respectivamente.

Era esperado que a U_{fi} não fosse influenciada pelo tamanho dos materiais, pois está mais associada a movimentação do material de menor tamanho, que neste caso é a areia, a qual não muda de diâmetro entre os ensaios. Tannous e Lourenço (2015), de fato, observaram que U_{fi} permanece praticamente constante com o aumento da razão de diâmetros para ambas as misturas binárias estudadas pelas autoras (eucalipto e endocarpo de tucumã combinados com areia). A variação desta velocidade, principalmente para as maiores razões de fração mássica, é um indicativo de que o aumento do tamanho da biomassa teve uma influência negativa na qualidade de fluidização, havendo a necessidade de uma maior velocidade de gás para que o leito inicie sua movimentação.

A velocidade de fluidização aparente (U_{fa}), em geral, aumentou com o aumento da razão de diâmetro entre 0,76 e 1,48 (Figura 5.4b). Este crescimento foi entre 40,5% e 222% para as razões de fração mássica de 2,5 m-% e 5,0 m-%, respectivamente. Entre as razões de diâmetro de 1,48 e 2,87, U_{fa} permaneceu praticamente constante, salvo para a razão de fração mássica de 12,5 m-%, em que a velocidade cresce 34,5%.

Outros trabalhos da literatura também avaliaram a influência da razão de diâmetro na U_{fa} . Tannous e Lourenço (2015) identificaram um aumento da 36,4% da U_{fa} com o aumento da razão de diâmetro da mistura eucalipto e areia ($D = 1,5$ e 3), considerando $\chi = 5,0$ m-%. O crescimento foi menor do que o observado para a mistura palha de milho e areia com estas mesmas razões de fração mássica e próximas razões de diâmetro (1,48 e 2,87), o que pode ser justificado pela diferença nas esfericidades dos materiais: as partículas de eucalipto apresentaram esfericidade de 0,42 e 0,47, enquanto que as partículas de palha de milho possuem esfericidade de 0,18 e 0,19, considerando em ambos os casos o método de Wadell (1935). A menor esfericidade da palha levou a um leito com mais espaços vazios, o

que facilita a passagem do ar entre as partículas e leva a um aumento da velocidade necessária para suspendê-las.

Com relação a mistura endocarpo do tucumã e areia, Tannous e Lourenço (2015), entretanto, verificaram que U_{fa} permaneceu praticamente constante com o aumento da razão de diâmetro (de 1,5 a 3,0), o que também foi observado para as misturas de palha de milho e areia com maiores razões de diâmetros (entre 1,48 e 2,87). Pérez et al. (2017) igualmente observaram um aumento de U_{fa} com D para a mistura bagaço de cana-de-açúcar e areia, sendo este aumento de 166% entre as razões de diâmetro de 1,00 e 1,98 considerando a razão de fração mássica de 5,3 m-%. Este aumento também menor do que o observado para a mistura palha de milho e areia entre as razões de 0,76 e 1,48 considerando esta mesma razão de fração mássica.

A velocidade de segregação (U_s), por sua vez, aumentou entre as razões de diâmetro 0,76 e 1,48, mas permaneceu praticamente constante para maiores valores de D , como pode ser observado na Figura 5.4c. O crescimento foi entre 59,4% e 150%, considerando as razões de fração mássica de 7,5 m-% e 5,0%, respectivamente.

Tannous e Lourenço (2015) também observaram que U_s permaneceu praticamente constante com o aumento de D entre 1,5 e 3 para as razões de fração mássica de 5,0m-% e 10,0 m-% da mistura de eucalipto e areia. A mistura tucumã e areia, entretanto, apresentou um aumento de U_s , entre 50,0% e 66,7%, quando a mesma faixa de D e razões de fração mássica foram avaliadas.

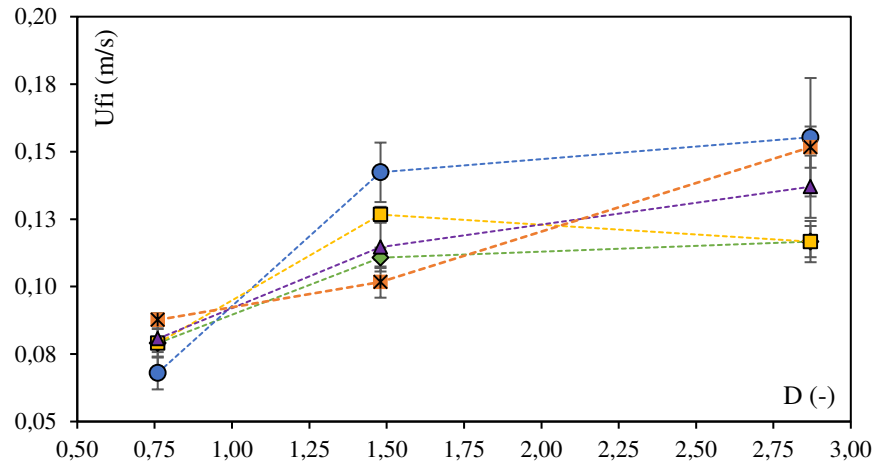
A velocidade de fluidização completa (U_{fc}) em geral aumentou com o aumento da razão de diâmetros, como pode ser visto na Figura 5.4d. Todavia, o crescimento foi mais expressivo para D entre 0,76 e 1,48 (entre 44% e 191%) do que entre 1,48 e 2,87 (máximo de 42,9%).

Tannous e Lourenço (2015) também observaram um aumento de U_{fc} com o aumento da razão de diâmetro das misturas biomassa/inerte. O aumento foi entre 33% e 75% para a mistura de eucalipto e areia e de no máximo 26% para a mistura de endocarpo de tucumã e areia, ambos com D variando entre 1,5 e 3.

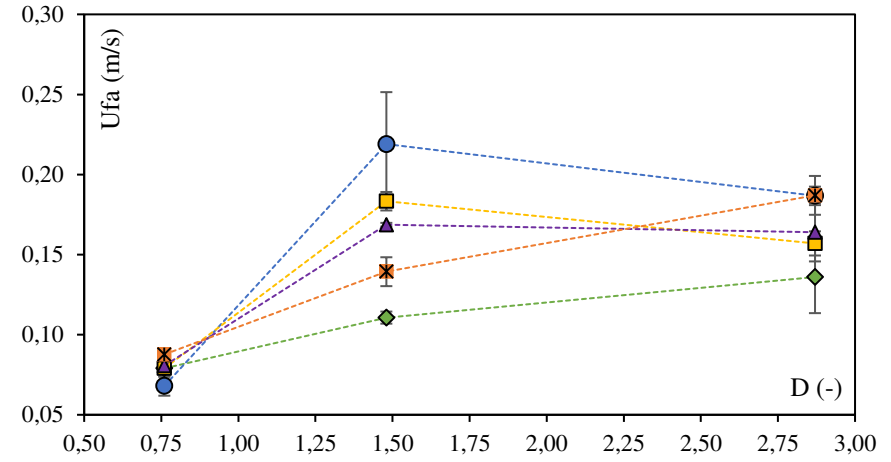
Figura 5.4 Velocidades características em função da razão de diâmetro

—◆— 2,5 m-% —●— 5,0 m-% —■— 7,5 m-% —▲— 10,0 m-% —×— 12,5 m-%

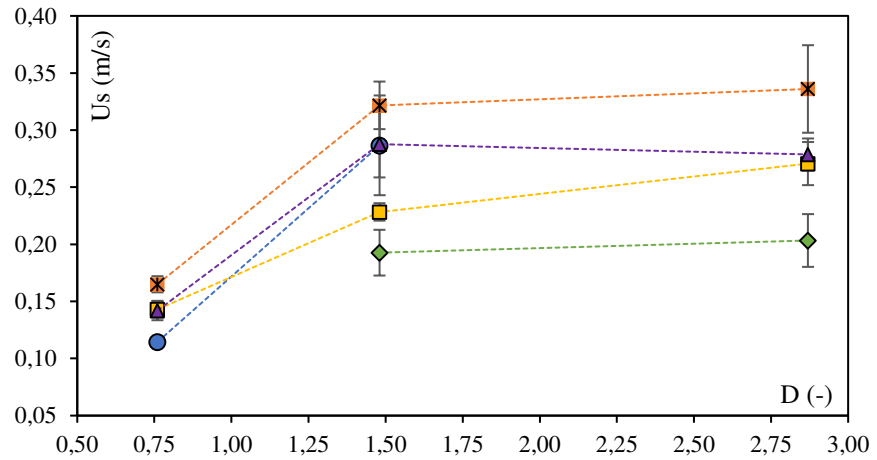
(a) Velocidade de fluidização inicial



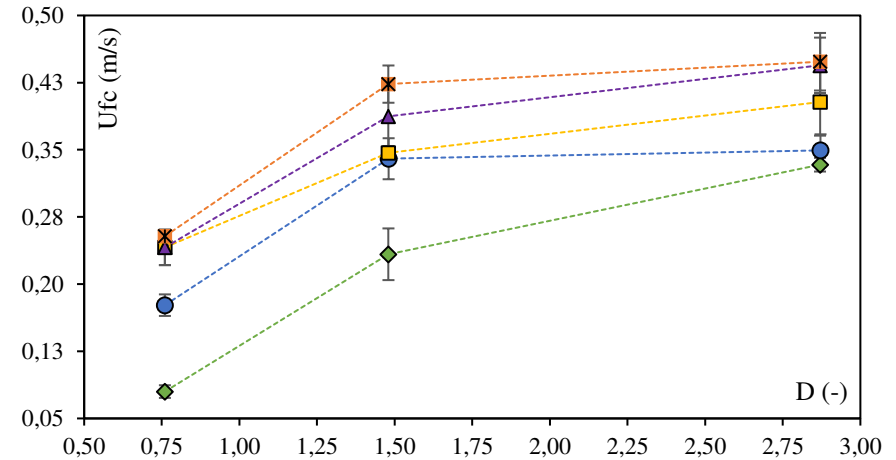
(b) Velocidade de fluidização aparente



(c) Velocidade de segregação



(d) Velocidade de fluidização completa



5.3.3. Influência da Razão de Fração Mássica

De forma análoga ao item anterior (5.3.2), a influência da razão de fração mássica entre biomassa e inerte foi analisada por meio de gráficos comparando as evoluções das velocidades U_{fi} , U_{fa} , U_s e U_{fc} , considerando um valor fixo de razão de diâmetro (Figura 5.5).

Diferentes variações foram observadas para a velocidade de fluidização inicial (U_{fi}) com a razão de fração mássica, como pode ser visto na Figura 5.5a. Enquanto para $D = 0,76$ U_{fi} é praticamente constante, para as maiores razões de diâmetro (1,48 e 2,87) U_{fi} aumenta entre 28,6% e 33,1% até a razão de fração mássica de 5,0 m-%.

Tannous e Lourenço (2015) avaliaram a variação de U_{fi} com o aumento da razão de fração mássica das biomassas entre 5 m-% e 20 m-%. Tanto para a mistura de eucalipto e areia, quanto para a de endocarpo de tucumã e areia, U_{fi} permaneceu constante independente do aumento da razão de fração mássica, comportamento observado nesta dissertação apenas para a menor razão de diâmetros (0,76).

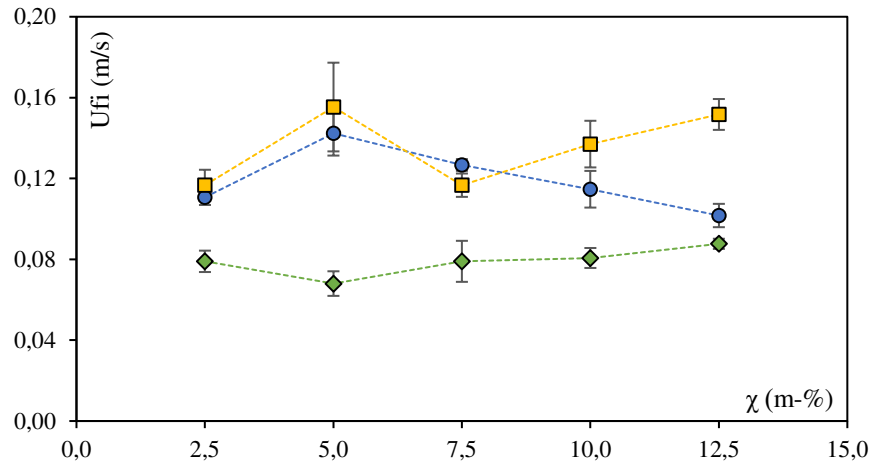
A velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) não foi influenciada pela razão de fração mássica quando se avalia a menor razão de diâmetro ($D = 0,76$), como se pode observar na Figura 5.5b. Para as demais razões de diâmetro, observa-se que U_{fa} cresceu entre 37,5% e 97,3% até a razão de fração mássica de 5,0 m-%. Para razões de fração mássica maiores (entre 7,5 m-% e 12,5 m-%), $D = 1,48$ apresenta uma diminuição de U_{fa} em 36,5%, enquanto para $D = 2,87$ a velocidade permanece praticamente constante.

Esta variação de comportamento da U_{fa} pode ser associada a separação dos materiais observada visualmente nos ensaios de fluidização. Para $D = 0,76$, como o leito se comportou basicamente como um sistema homogêneo, tem-se U_{fa} próximo ao do inerte. Para $D = 1,48$, quanto maior a razão de fração mássica, maior é a camada na parte superior do leito após a separação das partículas de biomassa e inerte, fazendo com que U_{fa} diminua e se aproxime da velocidade mínima de fluidização do inerte. Para $D = 2,87$, esta camada de biomassa na parte superior do leito influencia negativamente a movimentação do inerte, o que ocasiona uma U_{fa} maior do que a identificada para a areia, mas ainda associada apenas a movimentação desta.

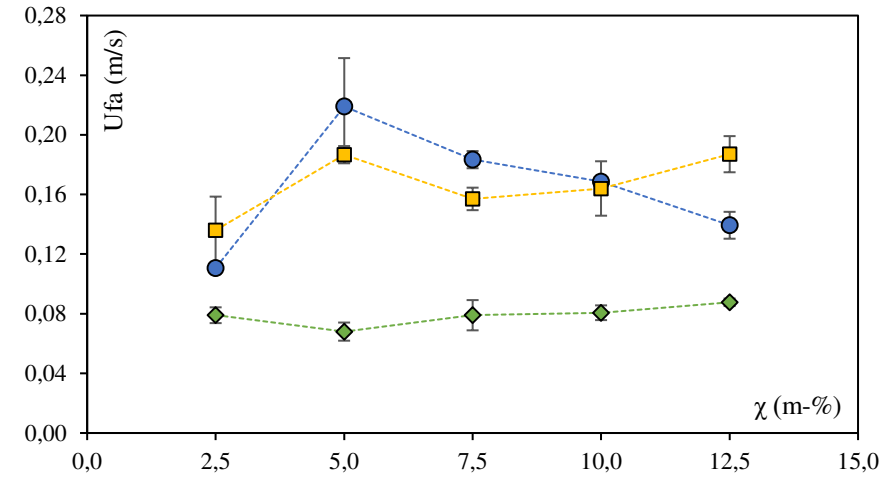
Figura 5.5 Velocidades características em função da razão de fração mássica entre biomassa e inerte

---◇--- $D = 0,76$ -●- $D = 1,48$ -■- $D = 2,87$

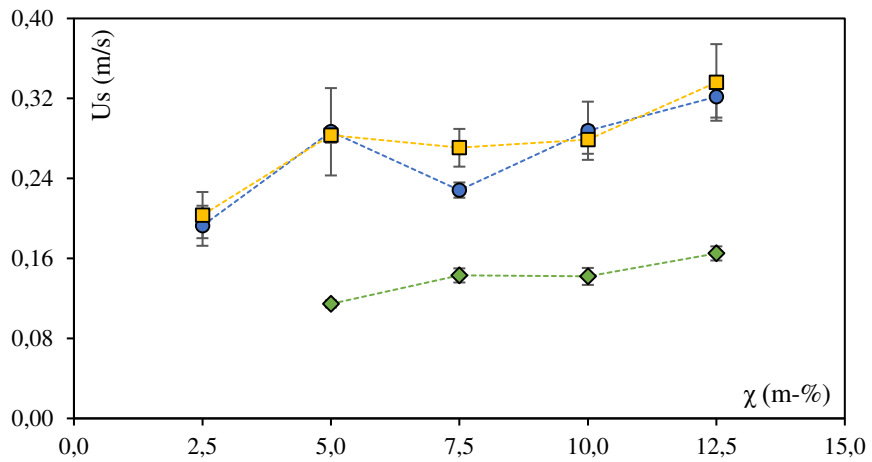
(a) Velocidade de fluidização inicial



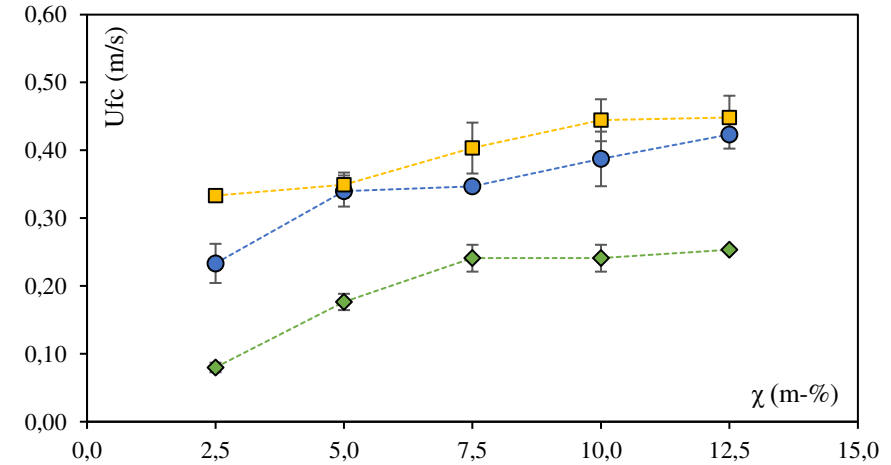
(b) Velocidade de fluidização aparente



(c) Velocidade de segregação



(d) Velocidade de fluidização completa



Karmakar et al. (2013) observaram um aumento médio entre 51% e 81% em U_{fa} avaliando as misturas de casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e serragem com areia, com variações na razão de fração mássica de 2 m-% a 11 m-%. Os autores avaliaram que o aumento da velocidade se deve ao fato de que as partículas de biomassa influenciaram negativamente a fluidodinâmica da mistura, o que também foi observado neste trabalho para as maiores razões de diâmetro.

Oliveira et al. (2013) observaram uma diminuição de até 32% em U_{fa} no seu estudo com razões de fração mássica de 5 m-% a 11 m-% de resíduo de tabaco e areia. Entretanto, U_{fa} permaneceu constante com o aumento da massa de casca de soja de menor razão de diâmetro ($D = 0,86$) e para todas as razões de diâmetro (0,71 a 1,86) avaliadas da mistura bagaço de sorgo e areia. Os autores observaram que para a maior razão de diâmetro e mássica, o leito apresentou empistonamento e formação de canais preferenciais, o que também foi observado nesta dissertação.

Tannous e Lourenço (2015), por sua vez, verificaram que para as misturas de eucalipto e endocarpo de tucumã com areia, U_{fa} permanece praticamente constante com a variação da razão de fração mássica de biomassa e inerte entre 5 m-% e 10 m-%. Pérez et al. (2017) observaram que para o bagaço de cana-de-açúcar, os diâmetros menores que o inerte utilizado ($0,33 < D < 1,00$), U_{fa} diminui com a razão de fração mássica (2-15 m-%). Para tamanhos maiores que o inerte ($1,00 < D < 15,8$), o efeito é contrário: U_{fa} aumenta com o aumento da razão de fração mássica. Os autores não correlacionam este comportamento com características do leito, assim uma comparação com os cenários observados neste trabalho não é possível de ser feita.

A velocidade de segregação (U_s) teve um aumento de 15,4% a 41,2% entre as razões de fração mássica de 7,5 m-% e 12,5 m-% para todas as razões de diâmetro estudadas (Figura 5.5c). Tannous e Lourenço (2015), por sua vez, verificaram que U_s permanece praticamente constante com a variação da razão de fração mássica tanto para a mistura eucalipto e areia quanto para endocarpo de tucumã e areia.

A velocidade de fluidização completa (U_{fc}) apresentou diferentes comportamentos entre as razões de diâmetro, como pode ser observado na Figura 5.5d. Para $D = 0,76$, U_{fc} teve um aumento de 201% com o aumento da razão de fração mássica até 7,5 m-%, mas para razões de fração mássica maiores, manteve-se constante. Entretanto, para $D = 1,48$ e 2,87, U_{fc} aumentou com o aumento da razão de fração mássica, sendo este aumento entre 34,5% a 81,5%, respectivamente. O resultado é corroborado por Tannous e Lourenço (2015), que

também observaram um aumento de U_{fc} com o aumento da razão de fração mássica para ambas as biomassas avaliadas pelas autoras (eucalipto e endocarpo de tucumã).

5.3.4. Influência das Variáveis Fluidodinâmicas sobre a Porosidade do Leito

A porosidade do leito foi avaliada em duas situações: quando o leito se encontra na velocidade de fluidização aparente (ε_{fa}) e quando se encontra na velocidade de fluidização completa (ε_{fc}). Os valores obtidos por meio do método da expansão do leito estão dispostos na Tabela 5.2. Estes parâmetros são indicativos da fração de vazios dentro do leito, associados ao borbulhamento e conseqüentemente a qualidade de fluidização. Torna-se assim relevante avaliar a influência das razões de diâmetro e de massa nestes parâmetros a fim de relacioná-los a qualidade da mistura.

A porosidade de fluidização aparente sofreu pouca influência da razão de diâmetro (Figura 5.6a), com valor máximo de aumento de 21,5% para a razão de fração mássica de 2,5 m-%. A pouca influência pode ser explicada pelo arranjo do leito observado quando esta porosidade foi medida. Na maioria dos casos, as partículas de biomassa e inerte encontravam-se separadas e ε_{fa} resultou da soma da porosidade da camada de biomassa estagnada e a porosidade associada ao borbulhamento do inerte, que é muito baixa quando comparada a da biomassa e assim não influencia o valor final do parâmetro.

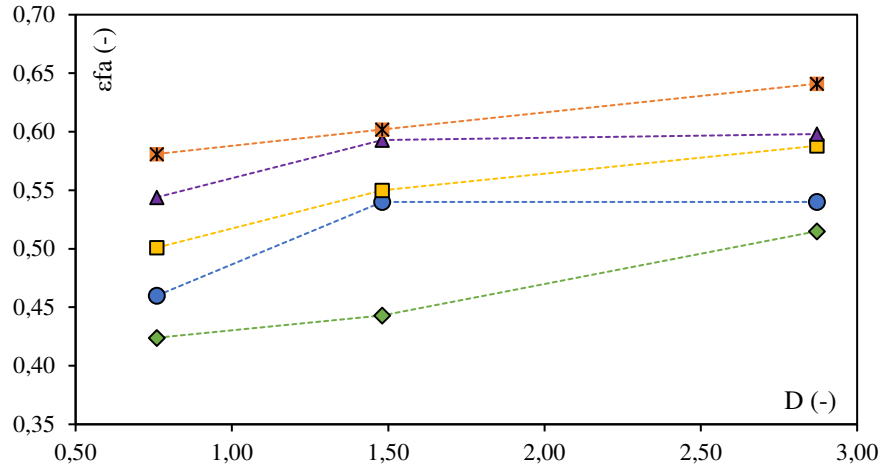
Todavia, a porosidade de fluidização aparente é bastante influenciada pela razão de fração mássica (Figura 5.7a). Foi observado um aumento de 37,0% em seu valor com o aumento da razão de fração mássica de 2,5 m% a 12,5 m% para $D = 0,76$. Nesta mesma faixa de razão de fração mássica, $D = 1,48$ apresentou um aumento de 35,9% em ε_{fa} e $D = 2,87$ um aumento de 24,5%. O aumento foi menor para a maior razão de diâmetro devido à separação dos materiais.

Alguns autores trazem resultados de porosidade de fluidização aparente que podem ser relevantes para a discussão deste trabalho. Oliveira et al (2013), apesar de não trabalhar a porosidade de fluidização aparente em seu artigo, trazem uma tabela com todos os valores obtidos e permite que algumas avaliações sejam feitas. Pode-se analisar que as misturas de resíduo de tabaco, bagaço de sorgo e casca de soja com areia também apresentam porosidades mais influenciadas para razão de fração mássica do que pela razão de diâmetro. Todas as misturas apresentaram um aumento da porosidade com o aumento da razão de fração mássica entre 5,0 -% e 15,0 m-%, sendo este máximo de 55,22% para a misturas resíduo de tabaco/areia com menor razão de diâmetro ($D = 0,22$). Porém, ao se avaliar a variação com a razão de diâmetro, verifica-se que os valores em geral permaneceram constantes.

Figura 5.6 Porosidade do leito em função da razão de diâmetro

◆ 2,5 m-% ● 5,0 m-% ■ 7,5 m-% ▲ 10,0 m-% ✕ 12,5 m-%

(a) Porosidade de fluidização aparente



(b) Porosidade de fluidização completa

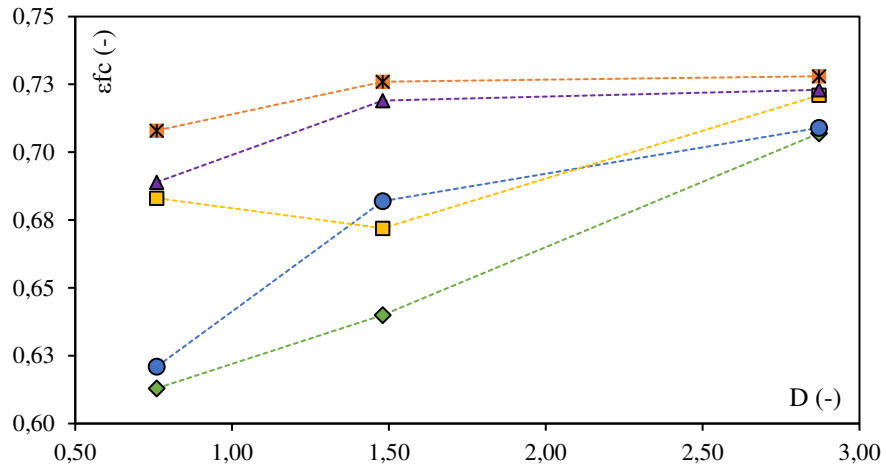
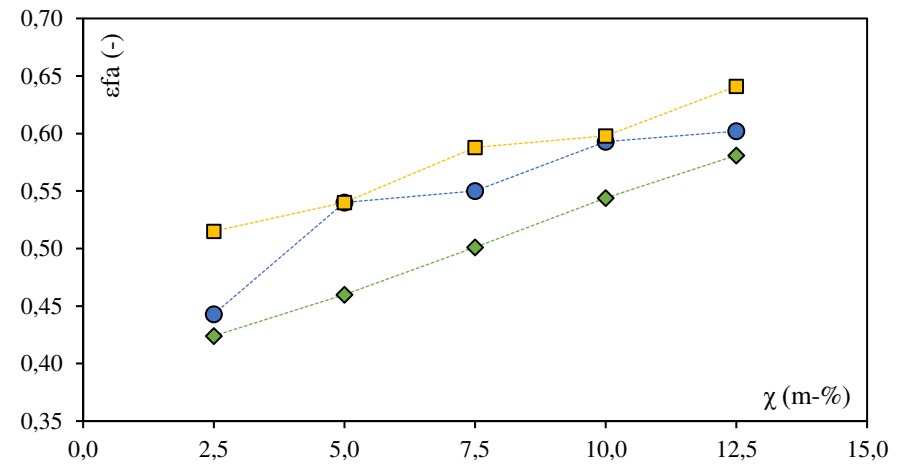


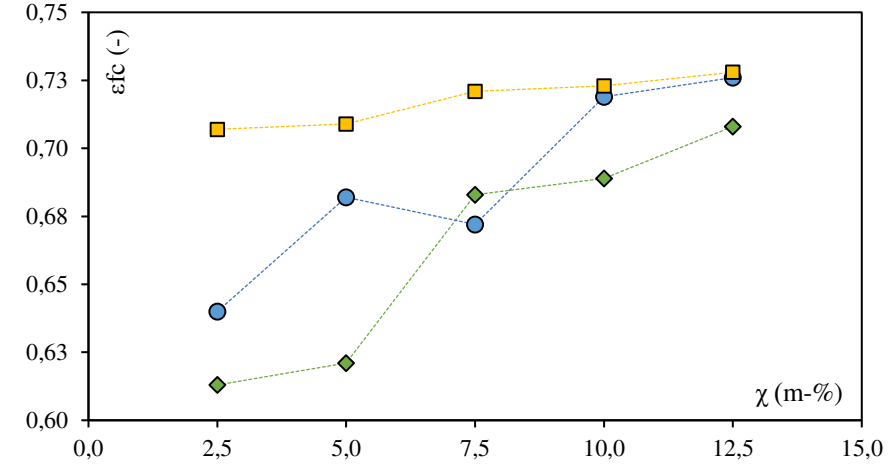
Figura 5.7 Porosidade do leito em função da razão de fração mássica de biomassa e inerte

◆ D = 0,76 ● D = 1,48 ■ D = 2,87

(a) Porosidade de fluidização aparente



(b) Porosidade de fluidização completa



A porosidade na fluidização completa (ε_{fc}) também pôde ser avaliada em relação a influência da razão de diâmetro (Figura 5.6b). Observou-se para as menores razões de fração mássica (2,5 m-% e 5,0 m-%) um leve aumento (14,1-15,3%) em ε_{fc} com o crescimento da razão de diâmetros. Razões de fração mássica maiores, todavia, não são influenciadas por D , e apresentam valores praticamente constantes.

A Figura 5.7b traz a evolução de ε_{fc} com a razão de fração mássica de biomassa e inerte. Verificou-se ε_{fc} aumenta 15,5% com o aumento desta razão considerando $D = 0,76$ e aumenta 13,4% considerando $D = 1,48$. Para $D = 2,87$ ε_{fc} é praticamente invariável.

Ressalta-se que nesta dissertação não foram feitas análises comparativas com as correlações da literatura, bem como a proposta de novas correlações para o cálculo das porosidades do leito.

5.4. Análise Comparativa entre Dados Experimentais e Correlações da Literatura

5.4.1. Velocidade de Fluidização Aparente

As correlações apresentadas na Tabela 3.2 foram utilizadas para a comparação com as velocidades de fluidização aparente experimental. Ressalta-se que, além das correlações para misturas binárias de biomassa e inerte, foram também avaliados modelos considerando misturas de inertes, devido a maior presença de material inerte (areia) nas misturas estudadas. Além disso, as correlações selecionadas têm similaridade com a faixa de diâmetro das partículas deste estudo ($0,253 \text{ mm} < d_p < 0,963 \text{ mm}$). A Tabela 5.3 traz o erro relativo médio absoluto calculado pela comparação entre as velocidades de fluidização aparente estimadas pelas correlações da literatura e obtidas experimentalmente neste trabalho.

Verifica-se que as correlações obtiveram ERMA entre 22,12% (Mourad et al., 1994) e 696,55% (Pérez et al., 2017). Os erros apresentados estão de acordo com o observado na literatura quando a comparação entre dados experimentais e preditos é realizada. Rao e Bheemarasetti (2001), por exemplo, reportam um erro relativo igual a 10,93%. Porém, Zhong et al. (2008), ao aplicar a equação destes autores, encontraram ERMA acima de 40%. Analogamente, Oliveira et al. (2013) relatam ERMA de 17,92% e Tannous e Lourenço (2015) de 63%. Paudel e Feng (2013) relataram erro relativo abaixo de 10%. Pérez et al. (2017) aplicaram a correlação destes autores a seus dados e encontraram erros relativos entre 2% e 36%. Pérez et al. (2017) também utilizaram as equações de Si e Guo (2008) e Zhong et al. (2008), obtendo erros relativos acima de 50% no primeiro caso e abaixo de 30% no segundo.

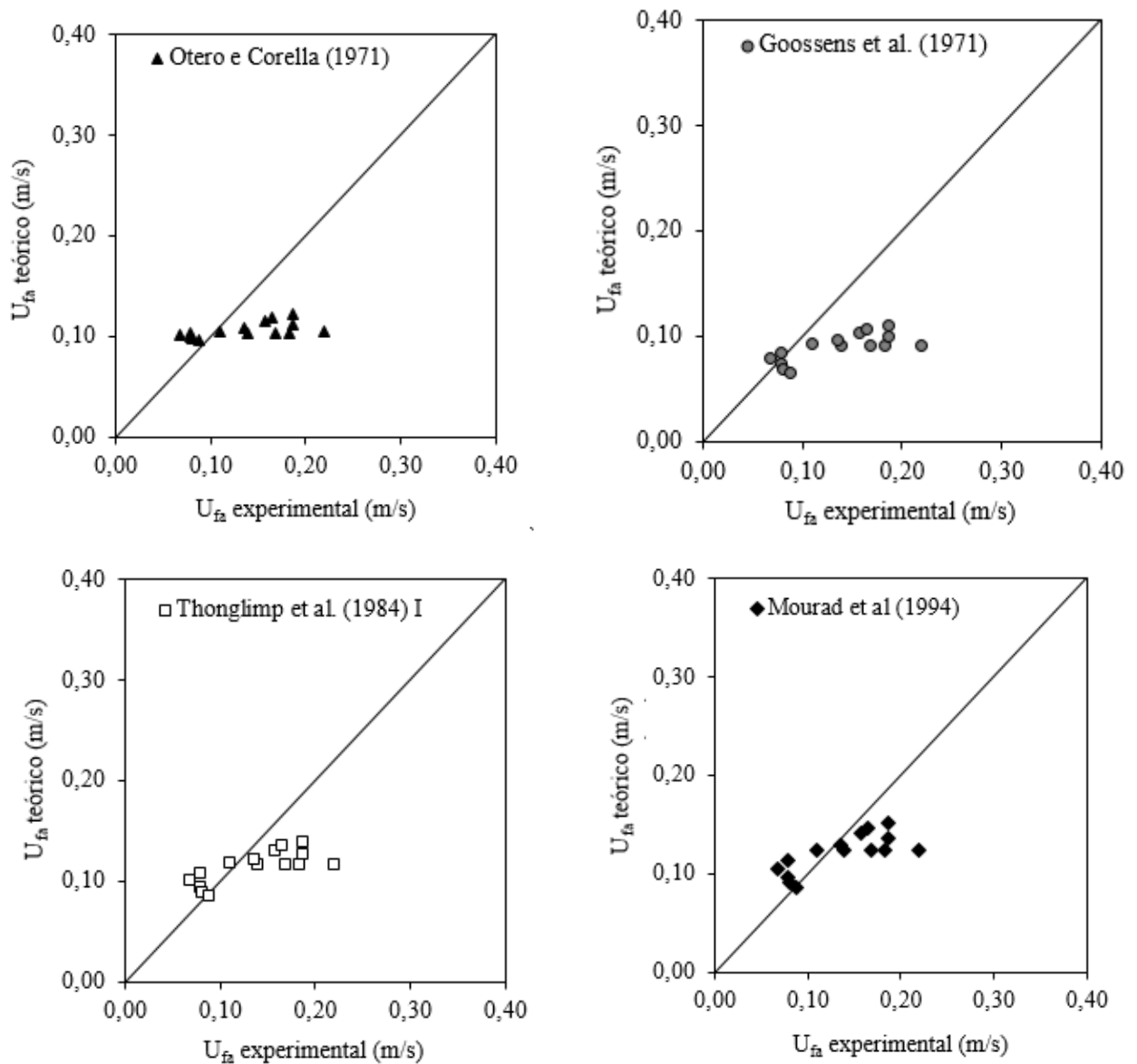
Tabela 5.3 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades de fluidização aparente teóricas obtidas por diferentes correlações

Estudo	Autor	ERMA (%)
Mistura binária de inertes	Otero e Corella (1971)	30,09
	Goossens et al. (1971)	30,61
	Cheung et al. (1974)	27,78
	Chiba et al (1979)	27,25
	Thonglimp et al. (1984b) I	23,89
	Thonglimp et al. (1984b) II	24,89
	Mourad et al (1994)	22,12
Mistura binária de biomassa e inerte	Rao e Bheemarasetti (2001)	66,04
	Zhong et al (2008)	27,67
	Si e Guo (2008)	75,80
	Oliveira et al. (2013)	39,87
	Paudel e Feng (2013)	38,85
	Kumoro et al (2014) I	95,18
	Kumoro et al (2014) II	77,65
	Tannous e Lourenço (2015)	23,97
Pérez et al. (2017)	696,55	

Em geral, observa-se que as correlações obtidas a partir de dados de misturas de materiais inertes resultaram em menores erros relativos (Figura 5.8). As velocidades teóricas apresentaram um erro menor que 30% e tendem a ser subestimadas, ou seja, resultarem em valores menores que os experimentais. A melhor precisão destes modelos era esperada porque o sistema em estudo é composto em sua maioria pelo material inerte, com frações mássicas de biomassa menores de 11,1% (razão de fração mássica de 12,5 m-%).

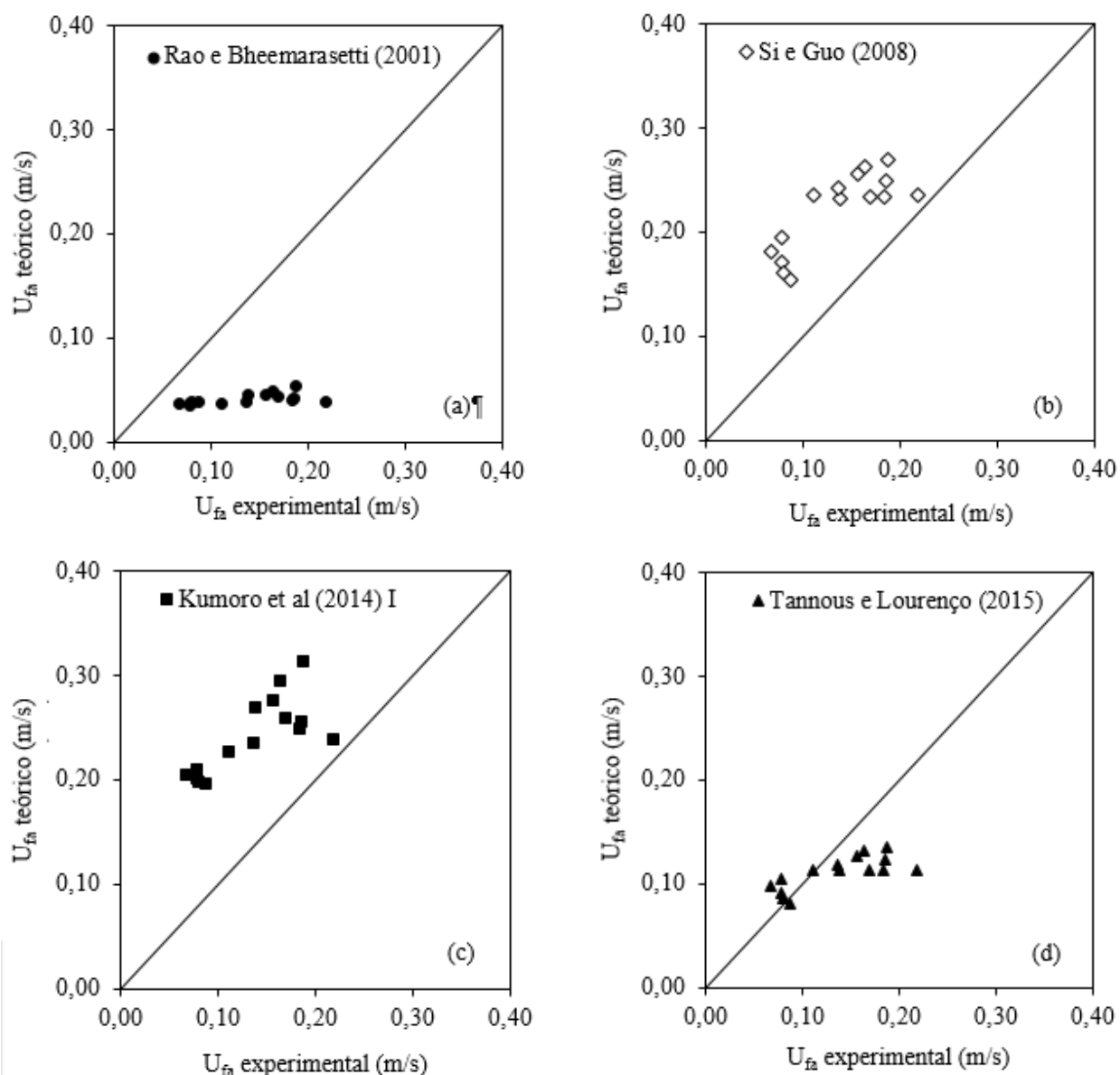
As correlações provenientes de misturas de biomassa e inerte apresentaram erros maiores que 30% e tenderam a superestimar as U_{fa} , com exceção da correlação de Rao e Bheemarasetti (2001), que apresentou valores com uma ordem de magnitude menor do que as demais correlações e ERMA de 66,07% (Figura 5.9a). Uma explicação pode estar no formato da equação, em que o termo do diâmetro de mistura é elevado a segunda potência. Como os diâmetros médios das partículas são pequenos (menores que 1,0 mm), a potência tende a diminuir o resultado da correlação.

Figura 5.8 Comparação entre velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) teórica e experimental - correlações a partir da mistura de inertes



As correlações de Si e Guo (2008) e Kumoro et al. (2014) foram as que apresentaram os valores mais superestimados de U_{fa} . A correlação dos primeiros autores teve um ERMA de 75,80% (Figura 5.9b), enquanto as duas equações apresentadas pelo segundo grupo de autores resultaram em ERMA de 95,18% (Figura 5.9c) e 77,65%, respectivamente. A pouca precisão destas correlações pode estar associada à inclusão da esfericidade no modelo proposto. Tannous e Lourenço (2015), por sua vez, apresentaram boa concordância entre os valores, com ERMA de 23,97%, o menor erro entre os modelos empíricos provenientes da mistura de biomassa e inerte (Figura 5.9d).

Figura 5.9 Comparação entre velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) teórica e experimental - correlações a partir da mistura de biomassa e inerte



Os valores obtidos pela correlação de Pérez et al. (2017) estão uma ordem de magnitude maiores do que os obtidos pelo procedimento experimental (ERMA de 696,55%). Uma explicação pode ser no fato do modelo de regressão ser do tipo potência, em que uma das constantes é um expoente. O uso deste tipo de equação considerando qualquer característica das partículas fora da faixa em que o modelo foi desenvolvido leva discrepâncias muito grandes, como analisado por Anantharaman et al. (2018). A massa específica das partículas da biomassa da palha de milho (936 kg/m^3) é maior do que das partículas de bagaço de cana utilizadas por Pérez et al. (2017), entre $465,9$ e $605,2 \text{ kg/m}^3$,

além do material inerte ter diâmetro médio (0,335 mm) levemente maior (0,255 mm) que a dos autores.

5.4.2. Velocidade de Fluidização Completa

A Tabela 5.4 apresenta o erro relativo médio absoluto calculado pela comparação das velocidades de fluidização completa obtidas de forma experimental e através das correlações descritas na Tabela 3.3.

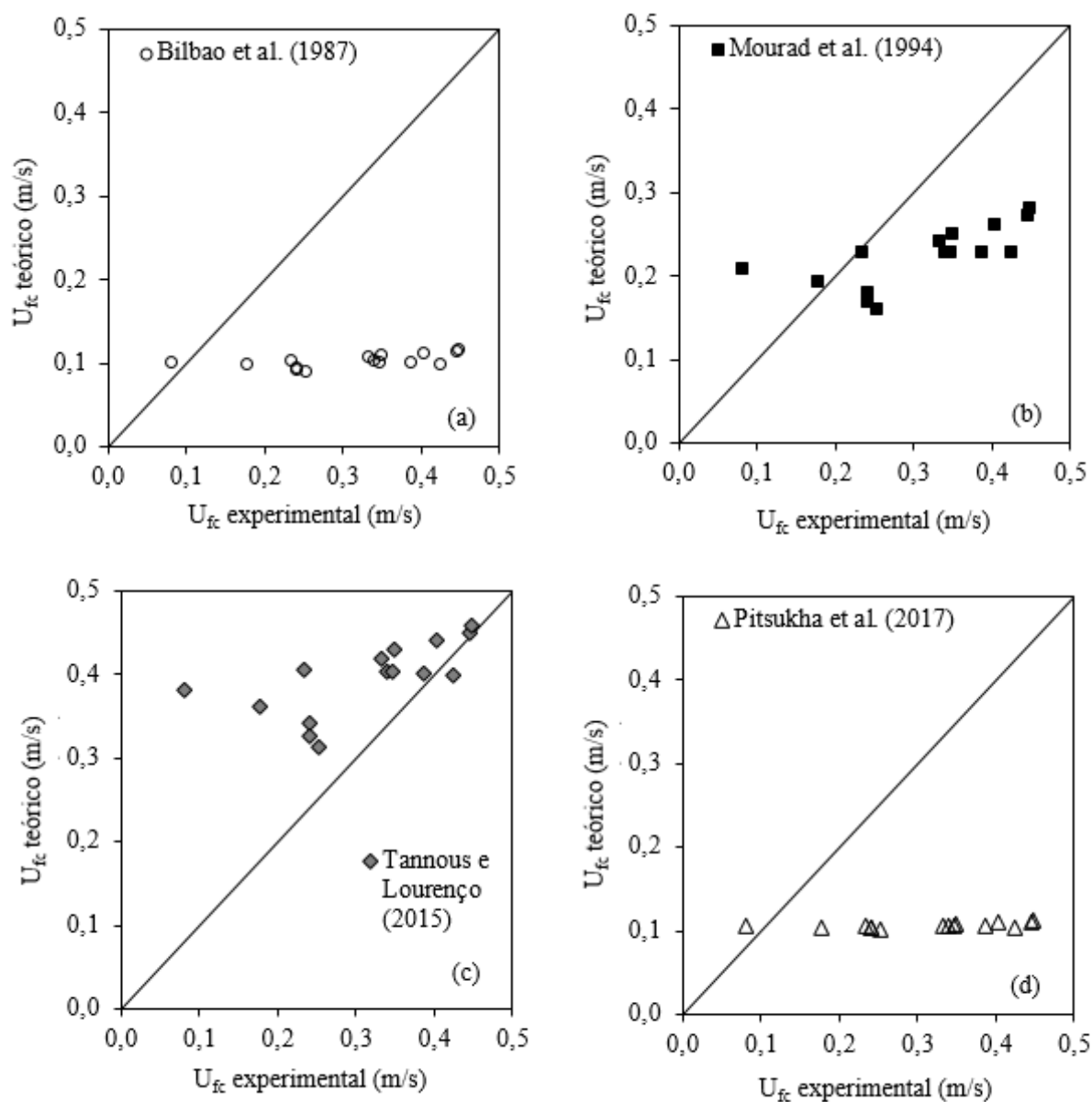
Tabela 5.4 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades de fluidização completa teóricas obtidas por diferentes correlações

Autor	ERMA (%)
Noda et al. (1986)	59,69
Bilbao et al. (1987)	63,99
Mourad et al. (1994)	38,96
Gauthier et al. (1999)	59,60
Tannous e Lourenço (2015)	50,81
Pitsukha et al. (2017)	63,22
Vasconcelos et al. (2018)	146,6

Observa-se que o ERMA variou de 38,96% e 146,61%. Os erros calculados estão acima dos relatados pelos autores em seus trabalhos. Noda et al. (1986) relataram um erro de 35%, Bilbao et al. (1987) entre 8 e 15%, Mourad et al. (1994) menor que 6%, Tannous e Lourenço (2015) de 20,71%, Pitsukha et al. (2017) menor de 4% e Vasconcelos et al. (2018) entre 7,9 e 20,5%.

Verifica-se que os dados experimentais em geral se encontram entre os calculados pelas correlações de Mourad et al. (1994) e Tannous e Lourenço (2015), os quais apresentaram menores ERMA de 38,96% (Figura 5.10b) e 50,81% (Figura 5.10c), respectivamente. As demais correlações (Figuras 5.10a e d) subestimam os valores de velocidade, ou seja, determinam velocidades menores do que as identificadas experimentalmente.

Figura 5.10 Comparação entre a velocidade de fluidização completa experimental e calculada por diferentes correlações da literatura



5.4.3. Velocidade de Fluidização Inicial e de Segregação

A Tabela 5.5 apresenta o erro relativo médio absoluto das velocidades teóricas de fluidização inicial e de segregação obtidas por meio das correlações da literatura descritas nas Tabelas 3.4 e 3.5, respectivamente.

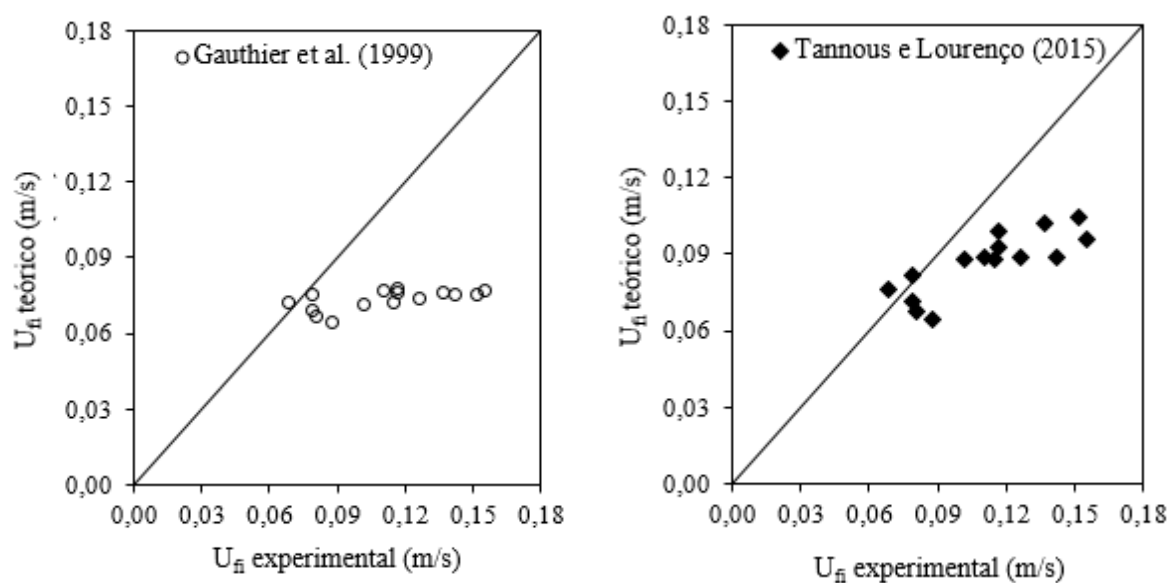
Para U_{fi} , a correlação que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a de Tannous e Lourenço, com ERMA de 21,55%. Este valor, entretanto, é maior do que o reportado pelas autoras, de 16,73%.

Tabela 5.5 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades teóricas de fluidização inicial e de segregação obtidas por diferentes correlações

Velocidade	Autor	ERMA (%)
U_{fi}	Gauthier et al. (1999)	31,08
	Tannous e Lourenço (2015)	21,55
U_s	Tannous e Lourenço (2015)	25,81

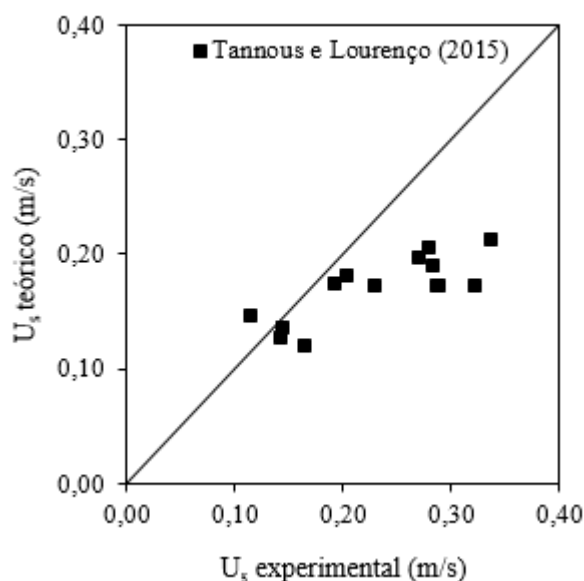
Observa-se na Figura 5.11 que as correlações subestimaram os dados experimentais, principalmente quando maiores razões de diâmetro são avaliadas ($D = 1,48$ e $2,87$). Verifica-se também que, nestes casos, as correlações não apresentaram um ajuste satisfatório, pois enquanto os dados experimentais apresentaram grandes variações de U_{fi} , com valores entre 0,068 e 0,155 m/s (eixo x), os valores teóricos têm uma variação menos expressiva, entre 0,064 e 0,105 (eixo y).

Figura 5.11 Comparação entre a velocidade de fluidização inicial experimental e calculada por diferentes correlações da literatura



Com relação a U_s , o ERMA obtido pela correlação de Tannous et al. (2018) foi de 25,81%, comparável com o reportado pelas autoras ao aplicarem a correlação em outros dados da literatura, de 25,26%. Mas, novamente, a correlação tende a subestimar os dados experimentais (Figura 5.12) e não acompanhar a tendência de crescimento da velocidade de segregação com o aumento da razão de fração mássica.

Figura 5.12 Comparação entre a velocidade de segregação experimental e calculada pela correlação de Tannous e Lourenço (2015)



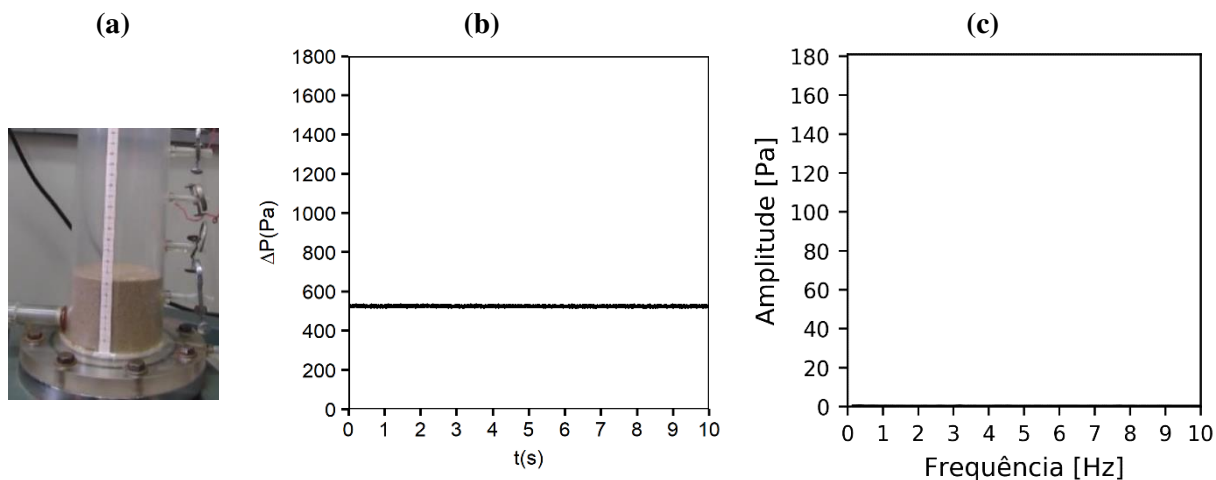
5.5. Identificação dos Comportamentos Fluidodinâmicos

5.5.1. Partículas Homogêneas

A análise das flutuações de pressão e espectros de potência, obtidos para a areia em diferentes velocidades superficiais do gás, permitiu a identificação de dois comportamentos fluidodinâmicos: fixo (Figura 5.13) e fluidizado (Figura 5.14). No comportamento fluidizado, por sua vez, três regimes foram analisados: borbulhamento (Figura 5.14a, b e c), pistão simétrico (Figura 5.14 d, e e f) e transição turbulenta (Figura 5.14 g, h e i), a partir da comparação com as observações encontradas na literatura para partículas homogêneas.

No estado de leito fixo (Figura 5.13a), a pressão teve valor constante no tempo, de forma a não haver flutuações (Figura 5.13b) e consequentemente o espectro de potência não apresentou nenhuma frequência característica (Figura 5.13c).

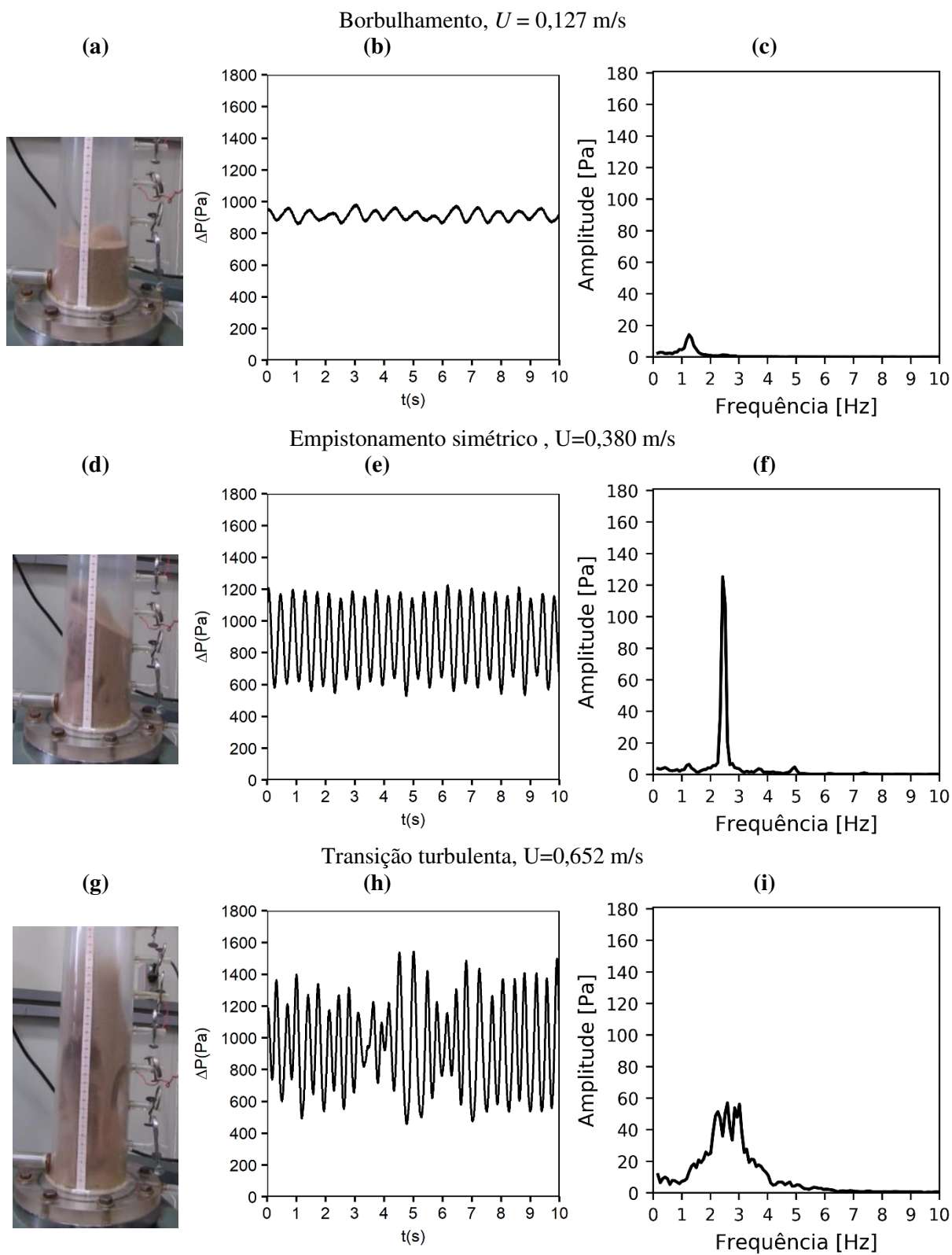
Figura 5.13 Imagem do leito (a), flutuação de pressão (b) e espectro de potência (c) no leito fixo. Ensaio: Areia, $U = 0,063$ m/s



No comportamento fluidizado, o primeiro regime examinado foi o de borbulhamento, caracterizado visualmente pela formação de bolhas com pequeno tamanho (Figura 5.14a). A flutuação de pressão (Figura 5.14b), devido ao pequeno volume de bolhas, apresentou baixa amplitude, de apenas 50 Pa aproximadamente, em relação à média de flutuações. O espectro de potência (Figura 5.14c), conseqüentemente, apresentou um pico de baixa amplitude, com 18 Pa. Além disso, observou-se que este se deslocou com o aumento da velocidade de 0,127 m/s a 0,380m/s (Figuras 5.14c e 5.14f, respectivamente) iniciando-se em 1 Hz, até atingir 2,5 Hz.

O segundo regime verificado foi o de empistonamento simétrico, conforme caracterizado por Geldart (1986) no item 3.3. Este regime também foi chamado de borbulhamento único por Johnsson et al. (2000) e apenas empistonamento por Felipe (2004). Neste caso, através da análise de imagem (Figura 5.14d), observou-se a formação de grandes bolhas, que atingem a superfície do mesmo de forma periódica. A flutuação de pressão (Figura 5.14e) exprime o caráter periódico visualizado, pois apresenta formato senoidal e amplitude praticamente constante, de aproximadamente 300 Pa em relação a média. O espectro de potência (Figura 5.14f) apresentou um pico bem definido na frequência dominante de 2,5 Hz e outros picos de baixa amplitude associados a pequenas bolhas. Também foi observado que, com o aumento da velocidade entre 0,127 m/s e 0,423 m/s, as características do leito se mantiveram dentro do regime, entretanto houve um aumento da amplitude do sinal.

Figura 5.14 Esquema ilustrativo (a), flutuação de pressão (b) e espectro de potência (c) dos diferentes estados fluidodinâmicos para as partículas de areia



O terceiro regime foi o de transição turbulenta. Verificou-se que grandes bolhas com diferentes frequências foram formadas ao longo do leito (Figura 5.14g) e se deslocaram rapidamente e romperam-se na sua superfície projetando as partículas para o topo da coluna. A flutuação de pressão, neste caso, apresentou diferentes componentes senoidais em diversas amplitudes (Figura 5.14h), como foi observado por Johnsson et al. (2000) e Felipe (2004) no regime de fluidização explosiva (Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente). O espalhamento da amplitude pode ser visto no espectro de potência (Figura 5.14i), o qual não apresenta uma frequência dominante, mas diversos picos de menor amplitude entre as frequências de 0 e 6 Hz.

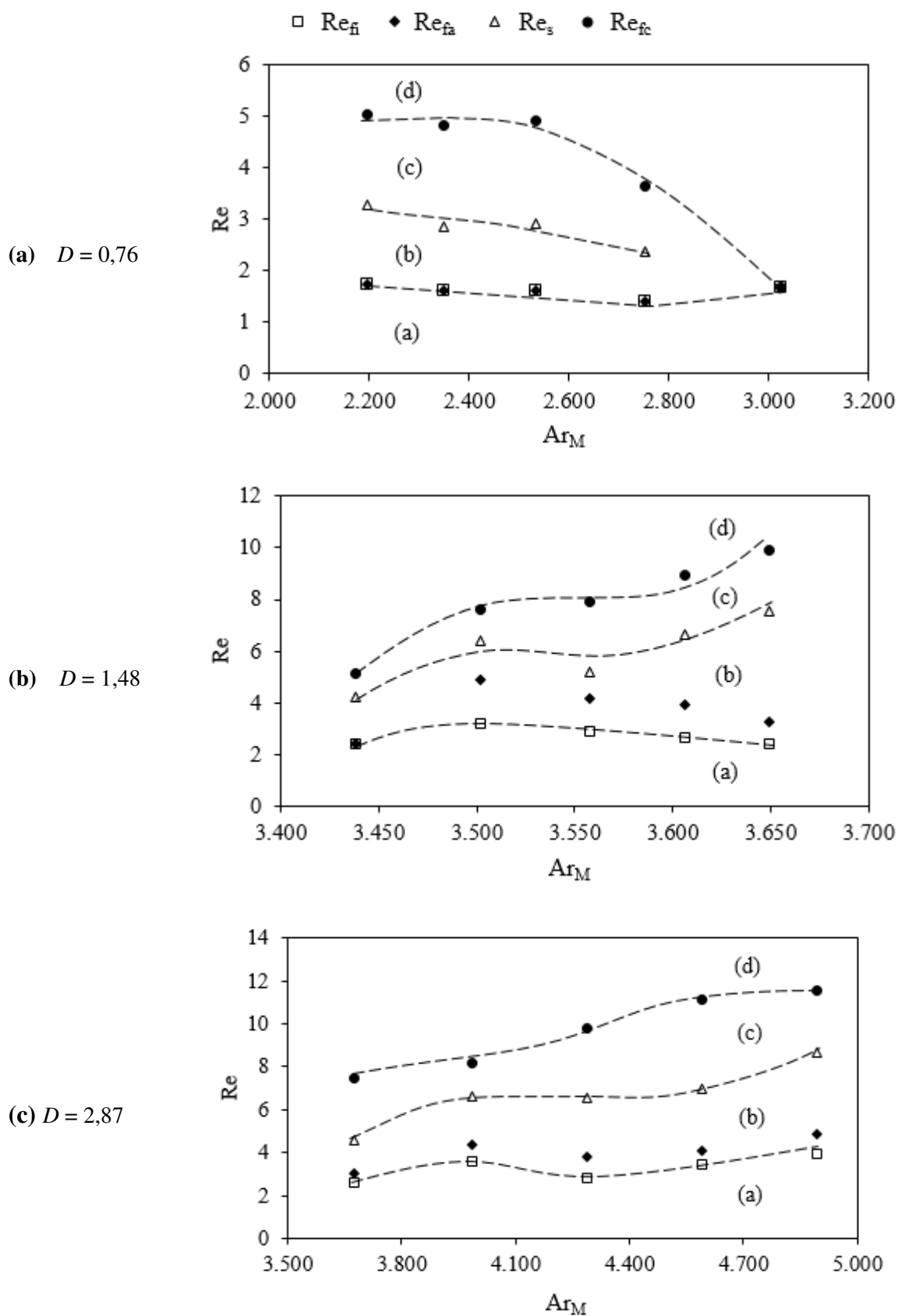
5.5.2. Misturas Binárias

Os comportamentos fluidodinâmicos das misturas binárias de biomassa e inerte foram avaliadas a partir da adaptação das definições de Mourad et al. (1994) e Tannous e Lourenço (2015) apresentadas no item 3.4 desta dissertação, a saber: leito fixo ($U \leq U_{fi}$), segregação total ($U_{fi} \leq U \leq U_s$), segregação parcial ($U_s \leq U \leq U_{fc}$) e mistura completa ($U \geq U_{fc}$).

Para melhor visualização da divisão dos comportamentos, construiu-se diagramas relacionando o número de Reynolds (Re) correspondente a cada velocidade característica com o número de Arquimedes de mistura (Ar_M), o qual foi calculado considerando as definições de Goossens et al (1971) para diâmetro e massa específica de mistura. Os diagramas estão dispostos na Figura 5.15.

Observou-se que os quatro comportamentos fluidodinâmicos definidos por Mourad et al. (1994) também foram encontrados para a mistura de palha de milho e inerte, avaliada nesta dissertação. Entretanto, ao invés de se utilizar U_{fa} como a velocidade que separa a segregação total e parcial, verificou-se ser mais adequado utilizar U_s , porque a diferença entre U_{fi} e U_{fa} , em geral, foi muito pequena para que um comportamento fosse bem definido, como pode ser observado na Figura 5.15.

Figura 5.15 Diagrama de identificação dos diferentes comportamentos fluidodinâmicos: (a) leito fixo, (b) segregação total, (c) segregação parcial e (d) mistura completa.



Para a razão de diâmetro de 0,76 (Figura 5.15a), verificou-se que o aumento da razão de fração mássica levou a diminuição do número de Ar , pois a adição de material com menor tamanho (a biomassa) diminuiu o diâmetro de mistura e conseqüentemente o valor calculado de Ar . Com isso, o leito com $\chi = 2,5$ m-% ($Ar = 3000$) tem um comportamento basicamente homogêneo, em que os valores de Re são iguais, enquanto o leito com $\chi = 12,5$ m-% ($Ar = 2200$) tem faixas de segregação bem definidas.

Para as demais razões de diâmetro (Figuras 5.15b e c), o aumento da razão de fração mássica aumentou o número de Ar , pois o efeito é contrário à situação anterior: A adição de material com maior tamanho aumentou o diâmetro de mistura. Entretanto, a mesma observação pode ser feita: as faixas entre os valores de Re , associadas a diferentes comportamentos, tenderam a aumentar com o aumento do Ar , pois a maior quantidade de biomassa influencia negativamente a mistura do leito, aumentando as regiões de segregação.

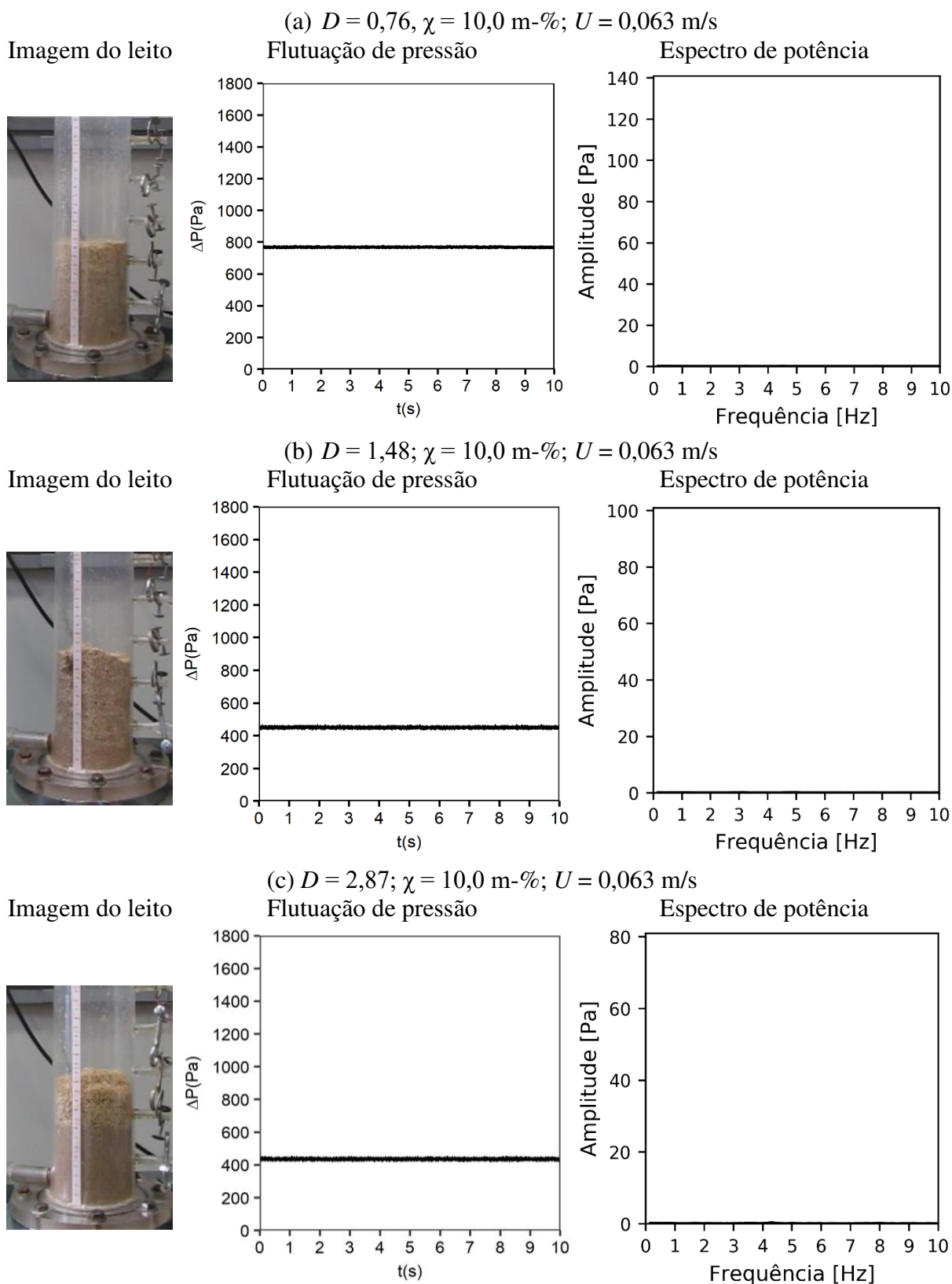
A seguir, cada comportamento fluidodinâmico será analisado pela observação visual do leito (análise de imagem), flutuação de pressão e espectro de potência correspondentes a faixa em questão.

Leito fixo ($U < U_{fi}$)

O primeiro comportamento observado foi o leito fixo ($U \leq U_{fi}$), em que os materiais permaneceram estáticos no leito, enquanto o ar percola as partículas sem conseguir movê-las, resultando em uma flutuação de queda de pressão constante, mas crescente com o aumento da velocidade até U_{fi} (Figura 5.1). A falta de oscilação da queda de pressão tem como consequência um espectro de potência nulo. Exemplos da visualização do leito, da flutuação de pressão e do espectro de potência estão apresentados na Figura 5.16 para (a) $D = 0,76$, (b) $D = 1,48$ e (c) $D = 2,87$, considerando a razão de fração mássica $\chi = 10,0$ m-%.

Uma importante observação neste comportamento é a da separação dos materiais em todos os casos avaliados (Figura 5.16 – imagens do leito). Enquanto na base do leito verificou-se uma camada rica em areia, na superfície encontrou-se uma camada rica em biomassa. A camada de biomassa aumentou com o aumento da razão de fração mássica, devido ao aumento da quantidade de palha de milho (2,5-12,5 m-%). Considerando a razão de diâmetros, o aumento no grau de separação das partículas para $D = 0,76$ foi menor (Figura 5.16a) em relação da $D = 1,48$ (Figura 5.16b), ao passo que para $D = 2,87$ (Figura 5.16c), a separação foi mais significativa entre biomassa e areia.

Figura 5.16 Imagem do leito, flutuação de pressão e espectro de potência no leito fixo ($U < U_{fi}$).



Segregação Total ($U_{fi} < U < U_s$)

Nesta situação, observou-se o borbulhamento parcial do leito, como pode ser visualizado nas Figuras 5.17a ($D = 0,76$, $\chi = 10,0$ m-%), 5.18a ($D = 1,48$, $\chi = 10,0$ m-%) e 5.19a ($D = 2,87$, $\chi = 10,0$ m-%). Observa-se que pequenas bolhas se formaram na base, mas não conseguiram coalescer nesta região, devido à presença da biomassa no topo. O entrelaçamento de partículas no topo leva a quebra das bolhas abaixo da camada de biomassa. Com isso, o gás intersticial percolou o material, sem movimentá-lo, formando canais preferenciais. A biomassa, como já discutido no item 3.5, apresenta baixa qualidade de fluidização.

Com efeito, a flutuação de pressão apresentou pequenas perturbações de baixa amplitude, sem a identificação de frequências bem definidas, o que pode ser verificado nas Figuras 5.17b ($D = 0,76$, $\chi = 10,0$ m-%), 5.18b ($D = 1,48$, $\chi = 10,0$ m-%) e 5.19b ($D = 2,87$, $\chi = 10,0$ m-%).

O espectro de potência, como consequência, não apresentou um perfil bem definido, sendo este de baixa amplitude, entre 0 e 10 Pa, nas frequências entre 0 e 4 Hz, considerando toda a faixa de velocidades avaliada nesta situação, conforme apresentado nas Figuras 5.17c ($D = 0,76$, $\chi = 10,0$ m-%), 5.18c ($D = 1,48$, $\chi = 10,0$ m-%) e 5.19c ($D = 2,87$, $\chi = 10,0$ m-%).

Em uma análise global, o aumento da razão de fração mássica (entre 2,5 e 12,5 m-%) e de diâmetro (entre 0,76 e 2,87) levou a diminuição da amplitude e da intensidade dos sinais de flutuação de pressão e frequência, pois a biomassa presente no topo influenciou negativamente o movimento do leito.

Segregação Parcial ($U_s < U < U_{fc}$)

As Figuras 5.17d, 5.18d e 5.19d mostram a dinâmica do leito nesta situação para os ensaios de razão de fração mássica 10,0 m-% e $D = 0,76$, 1,48 e 2,87, respectivamente. Nestes casos o aumento da velocidade de gás, entre U_s e U_{fc} , levou a um crescimento do volume das bolhas, de maneira a aumentar progressivamente a movimentação e mistura das partículas de biomassa e areia, reduzindo paulatinamente a camada rica em biomassa no topo.

Figura 5.17 Esquema ilustrativo, flutuação de pressão e espectro de potência para os diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Ensaio: $D = 0,76$; $\chi = 10,0$ m-%

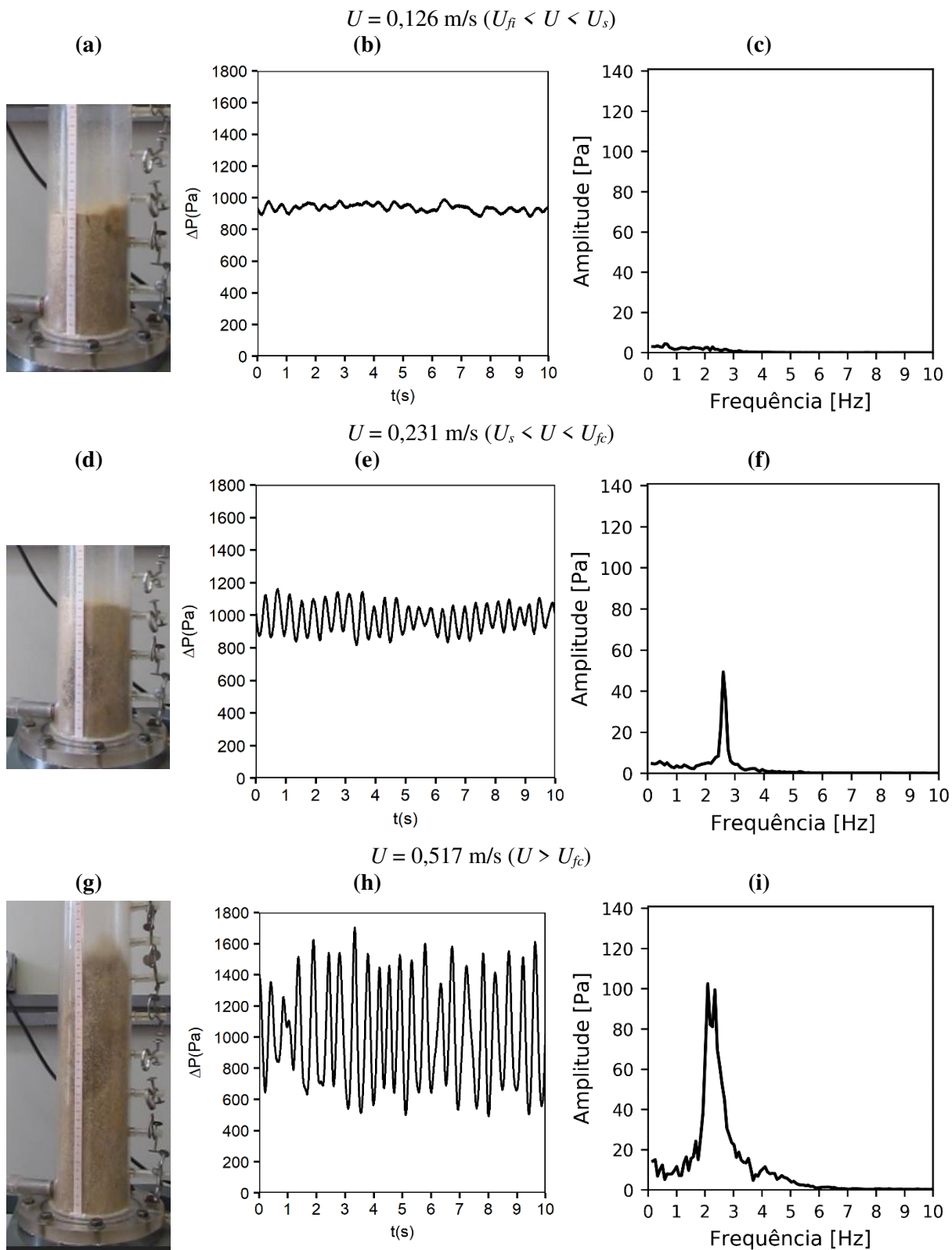


Figura 5.18 Esquema ilustrativo, flutuação de pressão e espectro de potência para os diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Ensaio: $D = 1,48$; $\chi = 10,0$ m-%

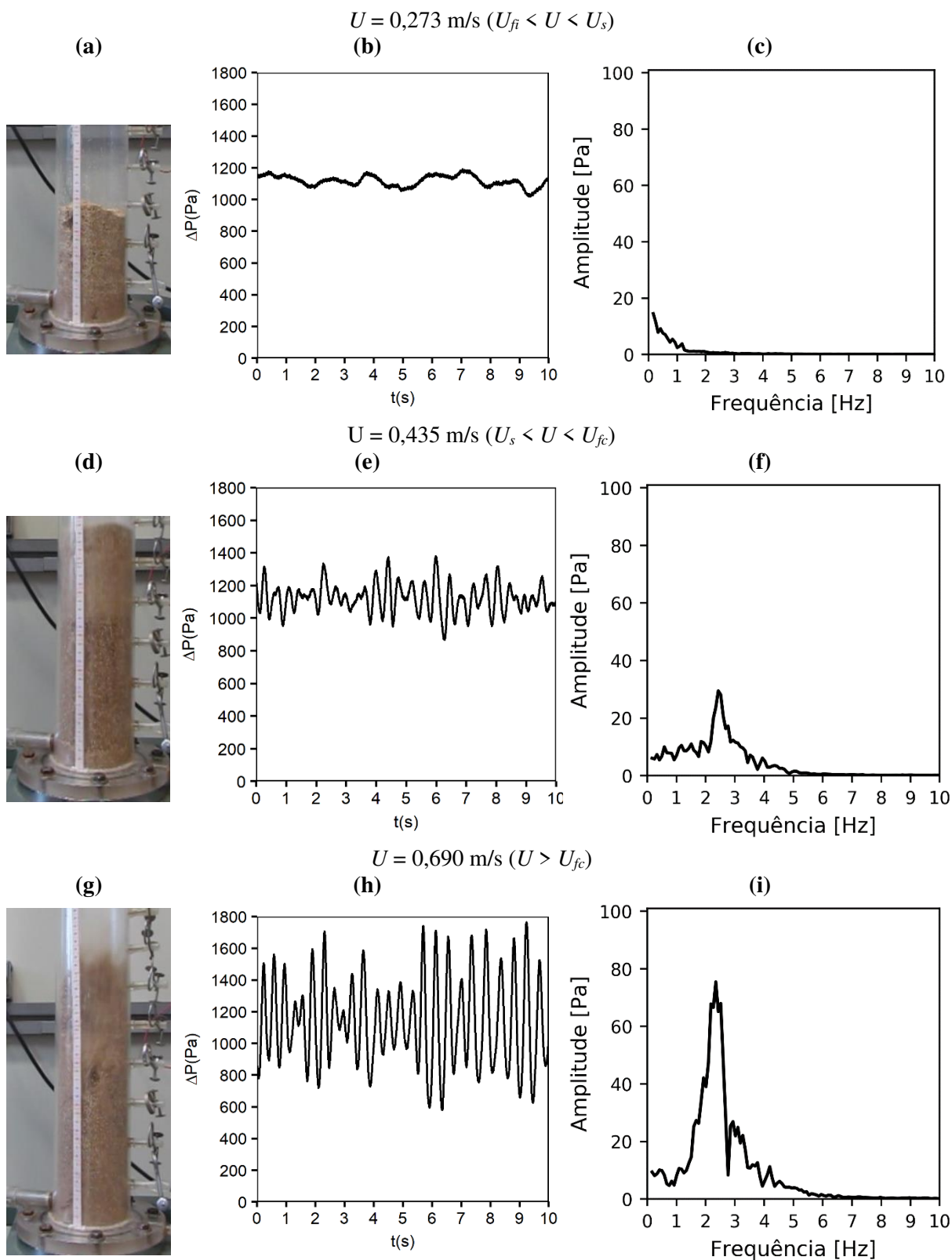
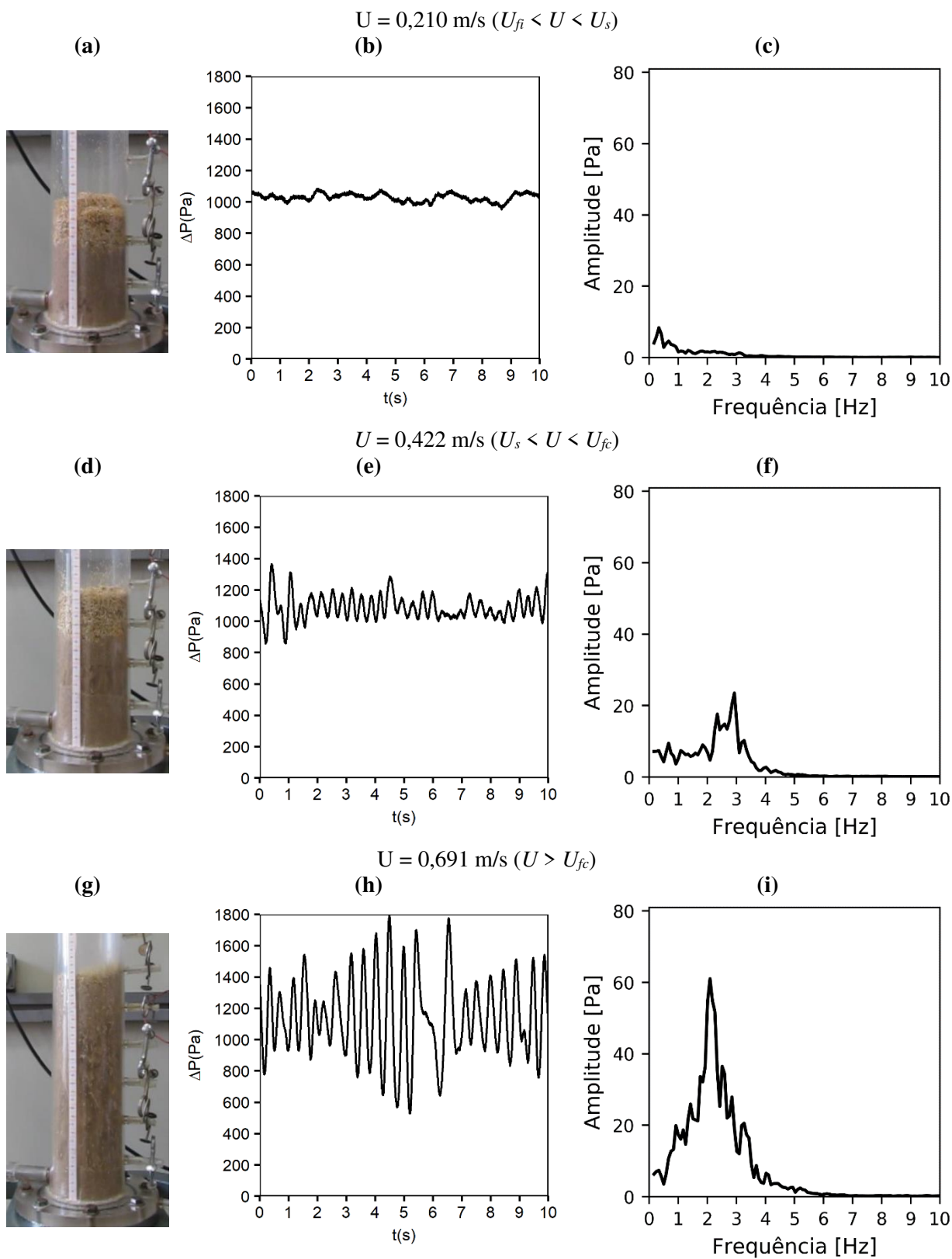


Figura 5.19 Esquema ilustrativo, flutuação de pressão e espectro de potência para os diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Ensaio: $D = 2,87$; $\chi = 10,0$ m-%



Entretanto, há momentos que esta camada atua de forma a bloquear a passagem das bolhas, formando uma região de alta concentração de gás. O conjunto de bolhas (pistão completo) eleva a camada até a uma altura em que o arranjo do leito se torna insustentável e o material cai abruptamente. Esta configuração pode ser considerada como uma “projeção” de partículas.

A flutuação de pressão se apresentou de dois modos (Figuras 5.17e, 5.18e e 5.19e) dentro do mesmo registro. O primeiro corresponde a faixas com menor variação da flutuação de pressão, sem uma frequência bem definida e com baixa amplitude, associadas ao borbulhamento dos materiais, como pode ser observado nas Figuras 5.18e, no período de 0 a 4 s, e 5.19e, no período de 6 a 10 s.

O segundo modo está ligado a faixas com a formação de senóides com frequência bem definida e maior amplitude, as quais correspondem a formação da região de alta concentração de gás (similaridade com pistão). As irregularidades analisadas nas flutuações de pressão podem estar associadas ao bloqueio da passagem de gás através da camada de biomassa na superfície, conforme visto nas Figuras 5.17d, 5.18d e 5.19d.

Esta situação resultou em um espectro de potência com diversos picos de baixa amplitude entre as frequências de 0 e 5 Hz, associados ao primeiro modo, além de um pico de frequência 2,5 Hz, correspondente ao segundo modo (Figuras 5.17f, 5.18f e 5.19f).

Em análise comparativa entre as razões de diâmetro verificou-se que a flutuação de pressão do ensaio com $D = 0,76$ (Figura 5.17e) apresentou frequências mais bem definidas e com maior amplitude do que o ensaio com $D = 2,87$ (Figura 5.19e). Além disso, o espectro de potência, apresentou uma diminuição na amplitude no pico em 2,5 Hz, como pode ser visto nas Figuras 5.17f ($D = 0,76$) e 5.19f ($D = 2,87$) onde o pico tem amplitude de 50 Pa e 25 Pa, respectivamente. Uma explicação para este fenômeno é que o aumento da razão de diâmetro e razão de fração mássica amplia a influência da biomassa na movimentação do leito. Isto é, enquanto para o diâmetro menor ($D = 0,76$) tem-se um leito com partículas menos entrelaçadas e menos impeditivas do movimento, favorecendo a formação de pistão simétrico (Figura 5.17d), para os maiores diâmetros (Figuras 5.18d e 5.19d) o entrelaçamento de partículas dificulta a mistura e movimentação, e os pistões formados são completos, atingindo o diâmetro do leito.

Mistura Completa ($U > U_{fc}$)

Neste caso, as partículas de biomassa e areia estão bem misturadas. Bolhas de grande tamanho são formadas próximas ao distribuidor e se deslocam rapidamente, causando um movimento aleatório e expansivo dos materiais. Imagens do leito nesta situação podem ser observadas nas Figuras 5.17g ($D = 0,76$, $\chi = 10,0$ m-%), 5.18g ($D = 1,48$, $\chi = 10,0$ m-%) e 5.19g ($D = 2,87$, $\chi = 10,0$ m-%).

A flutuação de pressão possui um comportamento oscilatório, com diferentes componentes senoidais e amplitude variável, associados as bolhas de diferentes volumes (Figuras 5.17h, 5.18h e 5.19h). As amplitudes dos senoides correspondentes as bolhas maiores, caracterizadas como pistão simétrico, se destacam no espectro de potência, entre as frequências de 1,5 e 3,0 Hz. Entretanto, observa-se também picos de menor amplitude em diferentes frequências na faixa de 0 a 6 Hz, os quais correspondem as bolhas de menor volume (Figuras 5.17i, 5.18i e 5.19i).

5.6. Elaboração de Novas Correlações para os Parâmetros Fluidodinâmicos

5.6.1. Velocidade de Fluidização Aparente

A elaboração de novas correlações para as velocidades características foi embasada no trabalho de Anantharaman et al. (2018), o qual traz uma revisão dos diversos artigos existentes na literatura que desenvolveram correlações para o cálculo da velocidade de mínima fluidização, em sua maioria para partículas homogêneas. Os autores observaram a existência de quatro configurações para a correlação, as quais são denominadas nesta dissertação como tipos 1, 2, 3 e 4.

$$\text{Tipo 1} \quad Re = (B_1^2 + B_2 Ar)^{0,5} - B_1 \quad (5.1)$$

$$\text{Tipo 2:} \quad Re = Z_1 Ar^{Z_2} \quad (5.2)$$

$$\text{Tipo 3:} \quad Re = \frac{Ar}{p + q\sqrt{Ar}} \quad (5.3)$$

$$\text{Tipo 4:} \quad U = KX^\alpha \quad (5.4)$$

na qual:

$$X = \left[\frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g}{\mu} \left(\frac{\rho_p}{\rho} \right)^{1,23} \right] \quad (5.5)$$

Estas estruturas de modelos foram aplicadas a dados experimentais com o objetivo de obtenção de uma correlação mais adequada do que as encontradas na literatura. Para o ajuste, os quatros modelos foram linearizados em relação aos parâmetros, a fim de tornar possível a aplicação do método de regressão. Para a Equação 5.1, foi usada sua versão obtida a partir de Equação de Ergun, em que o número de Arquimedes (Ar) é a constante adimensional isolada, como na Equação 5.6.

$$Ar = J_1 Re^2 + J_2 Re \quad (5.6)$$

Esta equação pode ser reescrita como:

$$y = b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (5.7)$$

E assim, é possível aplicar as técnicas da regressão multilinear para se obter os parâmetros J_1 e J_2 . Após a regressão, os parâmetros B_1 e B_2 , do modelo original (Equação 5.1) são calculados através das Equações 5.8 e 5.9.

$$B_1 = \frac{J_2}{2J_1} \quad (5.8)$$

$$B_2 = \frac{1}{J_1} \quad (5.9)$$

A linearização da Equação 5.2 resultou na Equação 5.10:

$$\ln Re = \ln Z_1 + Z_2 \ln Ar \quad (5.10)$$

A Equação 5.3, por sua vez, foi linearizada conforme a Equação 5.11:

$$\left(\frac{Ar}{Re}\right) = p + q\sqrt{Ar} \quad (5.11)$$

Por fim, a linearização da Equação 5.4 foi realizada segundo a Equação 5.12.

$$\ln U = \ln K + \alpha \ln X \quad (5.12)$$

Nos casos das Equações 5.10 a 5.12, as equações foram reescritas como:

$$y = b_1 + b_2 x \quad (5.13)$$

As técnicas da regressão linear foram aplicadas para obtenção de b_1 e b_2 , os quais são posteriormente convertidos nos valores dos parâmetros originais dos modelos. A regressão multilinear da Equação 5.6 foi realizada por meio da função PROJ.LIN do programa Microsoft Excel®. A regressão linear das Equações de 5.10 a 5.12 foi desenvolvida pela ferramenta Análise de Dados – Regressão, do mesmo software.

A análise ANOVA dos modelos foi realizada para verificação de sua adequação e significância, considerando o intervalo de confiança de 95%. As metodologias utilizadas foram a identificação do F de significação, p-valor e a análise da distribuição normal dos resíduos. Ressalta-se que, para o modelo ser considerado adequado, os valores de F de significação e p-valor devem ser menores de 5% (considerando o intervalo de confiança de 95%) e a distribuição normal dos resíduos deve ser linear.

Além da avaliação dos quatro tipos de correlações, também foram avaliadas duas abordagens para os cálculos do diâmetro e massa específica de mistura. Na primeira situação as definições de Goossens et al. (1971) foram utilizadas, enquanto na segunda situação foram aplicadas as definições utilizadas por Zhong et al. (2008) e Oliveira et al. (2013), conforme descritas na Tabela 3.2.

A nova correlação foi proposta considerando dados da literatura e dados experimentais desta dissertação, totalizando 122 pontos. Os dados da literatura foram obtidos de Karmakar et al. (2013), Oliveira et al. (2013), Pécora et al. (2014) e Tannous e Lourenço (2015). A Tabela 5.6 traz os modelos obtidos, bem como o erro relativo médio absoluto (ERMA) de cada correlação. É importante ressaltar que todas as correlações passaram nos testes da ANOVA de F de significação, p-valor e probabilidade normal dos erros.

Verifica-se que o melhor ajuste foi obtido para a correlação do Tipo 3 e abordagem de Zhong et al. (2008) e Oliveira et al. (2013), a qual apresentou menor ERMA, de 21,22% (Equação 5.20). Observa-se na Figura 5.20 que o modelo apresenta boa concordância com os dados experimentais, principalmente os desta dissertação. Entretanto, alguns pontos foram subestimados e superestimados pela correlação.

Tabela 5.6 Novas correlações empíricas para o cálculo da velocidade de fluidização aparente de misturas binárias

Tipo	Equação		ERMA (%)	Abordagem
1	$Re_{fa} = (5,05^2 + 0,016Ar_M)^{0,5} - 5,05$	(5.14)	47,03	
2	$Re_{fa} = 1,82 \times 10^{-3} Ar_M^{0,894}$	(5.15)	24,04	Goossens et al. (1971) $1,2 \times 10^3 < Ar_M < 7,6 \times 10^4$ $0,68 < Re_{fa} < 26,7$
3	$Re_{fa} = \frac{Ar_M}{1100 + 4,04\sqrt{Ar_M}}$	(5.16)	23,02	
4	$U_{fa} = 1,30 \times 10^{-5} \left[\frac{\bar{d}_M^2 (\bar{\rho}_M - \rho) g}{\mu} \left(\frac{\bar{\rho}_M}{\rho} \right)^{1,23} \right]^{0,643}$	(5.17)	31,68	
1	$Re_{fa} = (9,82^2 + 0,011Ar_M)^{0,5} - 9,82$	(5.18)	21,56	
2	$Re_{fa} = 5,49 \times 10^{-3} Ar_M^{0,731}$	(5.19)	22,49	Zhong et al. (2008) e Oliveira et al. (2013) $1,3 \times 10^3 < Ar_M < 1,6 \times 10^5$ $0,67 < Re_{fa} < 31,5$
3	$Re_{fa} = \frac{Ar_M}{986 + 11,6\sqrt{Ar_M}}$	(5.20)	21,22	
4	$U_{fa} = 1,49 \times 10^{-5} \left[\frac{d_{ef}^2 (\rho_M - \rho) g}{\mu} \left(\frac{\rho_{ef}}{\rho} \right)^{1,23} \right]^{0,607}$	(5.21)	22,44	

Para verificar se esta nova correlação representa melhor os dados experimentais do que os modelos já existentes na literatura, as correlações que apresentaram menor erro relativo quando aplicadas aos dados desta dissertação, no item 5.4.1, foram também empregadas considerando todos os dados utilizados na obtenção do novo modelo e o ERMA foi calculado. Os resultados estão dispostos na Tabela 5.7.

A nova correlação apresentou menor erro relativo do que todas as demais correlações selecionadas, pois estas resultaram em erros relativos entre 22,46% e 53,47%, correspondentes as correlações de Thonglimp et al. (1984b) II e de Paudel e Feng (2013), respectivamente.

Figura 5.20 Comparação entre as velocidades de fluidização aparente experimentais e calculadas pela nova correlação

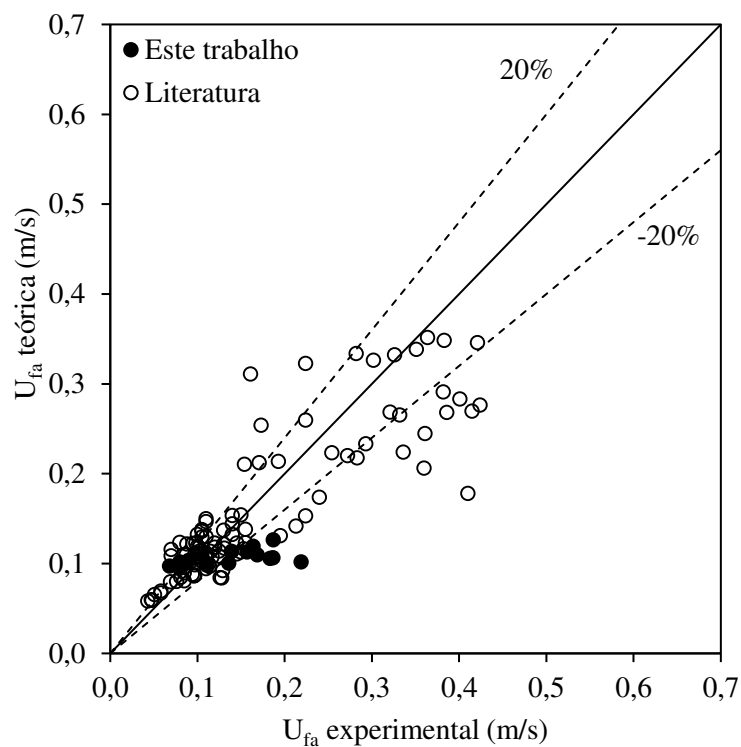


Tabela 5.7 Erro relativo médio absoluto (ERMA) das velocidades de fluidização aparente teóricas obtidas por diferentes correlações

Autores	ERMA (%)
Thonglimp et al. (1984b) I	22,91
Thonglimp et al. (1984b) II	22,46
Mourad et al (1994)	29,15
Zhong et al (2008)	31,43
Paudel e Feng (2013)	53,47
Tannous e Lourenço (2015)	22,66
Nova Correlação	21,22

5.6.2. Velocidade de Fluidização Completa

A proposta de uma nova correlação para a determinação da velocidade de fluidização completa também se baseou nos 4 tipos de modelo empírico avaliados por Anantharaman et al. (2018) e descritos nas Equações 5.1 a 5.4. Entretanto, apenas a abordagem de Goossens et al. (1971) foi utilizada para o cálculo do diâmetro e massa específica de mistura, de acordo com os modelos encontrados na literatura (Tabela 3.3).

As mesmas técnicas de regressão e da análise ANOVA descritas no item 5.6.1 foram aplicadas nesta situação. Para o ajuste, além dos dados experimentais desta dissertação, também foram utilizadas U_{fc} dos autores Oliveira e Tannous (2009), De Mitri et al. (2011) e Tannous e Lourenço (2015), totalizando 63 pontos.

Apenas a equação do tipo 2 foi obtida. A equação do tipo 1 (Equação 5.1) apresentou parâmetros negativos, os quais são estatisticamente aceitáveis quando a análise ANOVA é realizada, ou seja, o modelo passa no teste do F de significação e do p-valor, mas resultam em valores negativos da constante adimensional de Arquimedes (Ar), o que não condiz com a realidade física do processo em estudo. A equação do tipo 3 (Equação 5.3) não foi considerada adequada porque seu F de significação foi de $0,12 > 0,05$, assim como a do tipo 4 (Equação 5.4) também apresentou F de significação de $0,49 > 0,05$.

Assim, a melhor correlação encontrada é a apresentada na Equação 5.22, que apresentou ERMA igual à 30,10% e é válida para $2,2 \times 10^3 < Ar_M < 1,2 \times 10^4$ e $1,68 < Re_{fc} < 45,9$:

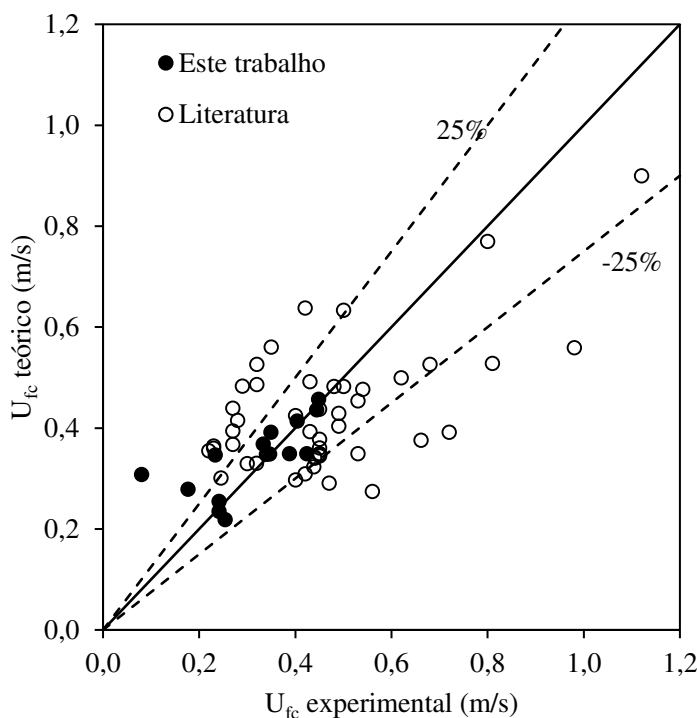
$$Re_{fc} = 2,79 \times 10^{-4} Ar_M^{1,254} \quad (5.22)$$

Verifica-se na Figura 5.21 a boa concordância deste modelo aos dados empíricos, sem subestimar ou superestimar os valores. Para verificar se o novo modelo é mais adequado do que os encontrados na literatura, as correlações de Mourad et al. (1994) e Tannous e Lourenço et al. (2015), apresentadas na Tabela 3.3, também foram aplicadas aos 63 valores de U_{fc} utilizados no ajuste e o ERMA foi calculado. Estes autores foram escolhidos porque apresentaram menor erro médio quando aplicados apenas aos dados experimentais deste trabalho (item 5.4.2).

A correlação de Mourad et al. (1994) levou a um ERMA de 37,42%. Ao mesmo tempo, a correlação de Tannous e Lourenço (2015) apresentou ERMA de 34,59%. Assim, a

nova correlação representa melhor os dados empíricos do que as equações anteriores, porque apresentou menor erro médio (30,10%).

Figura 5.21 Comparação entre as velocidades de fluidização completa empíricas e calculadas pela nova correlação



5.6.3. Velocidade de Fluidização Inicial e de Segregação

Da mesma forma que nos itens anteriores (5.6.1 e 5.6.2) novas correlações para as velocidades de fluidização inicial e de segregação foram determinadas a partir dos quatro tipos de modelo (Equações 5.1 a 5.4) encontrados na literatura, considerando a abordagem de Gossens et al. (1971) para o cálculo das características de mistura. As técnicas de regressão foram utilizadas para se determinar os parâmetros de cada modelo. Os modelos obtidos foram então validados por meio da análise ANOVA e o erro relativo médio absoluto foi calculado.

Para a velocidade de fluidização inicial, além dos dados experimentais desta dissertação, também foram utilizados os valores de U_{fi} de De Mitri et al. (2011) e Tannous e Lourenço (2015), totalizando 54 pontos.

Apenas o modelo do tipo 2 resultou em uma correlação física e estatisticamente adequada. Novamente a tentativa de ajuste ao modelo do tipo 1 levou a parâmetros negativos. O modelo do tipo 3 foi considerado inadequado pela análise ANOVA porque o parâmetro “p”

apresentou p-valor igual à $0,06 > 0,05$. O modelo do tipo 4, por sua vez, também foi considerado inadequado por apresentar F de significação $0,49 > 0,05$.

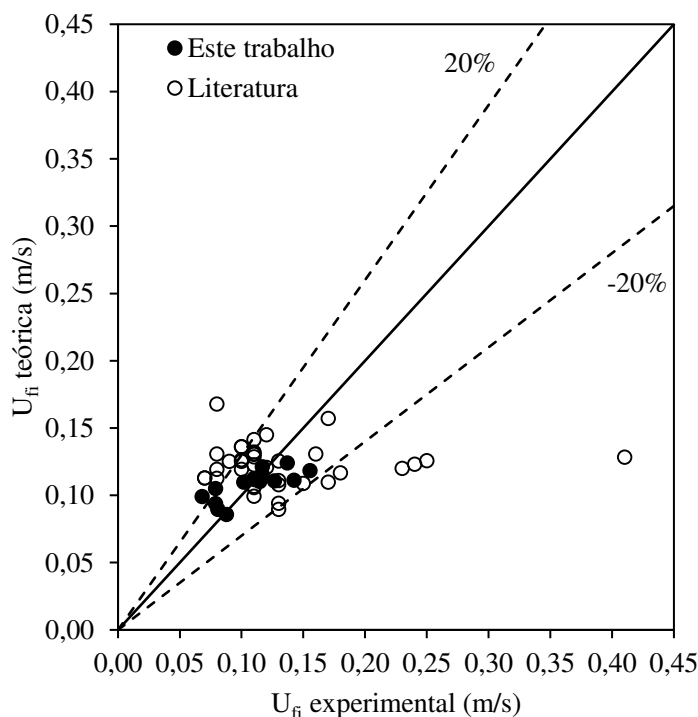
Assim, a nova correlação para U_{fi} está apresentada na Equação 5.23, a qual apresentou ERMA de 24,00% e é válida para $2,2 \times 10^3 < Ar_M < 1,2 \times 10^4$ e $1,40 < Re_{fi} < 11,4$:

$$Re_{fi} = 3,11 \times 10^{-3} Ar_M^{0,819} \quad (5.23)$$

Observa-se na Figura 5.22 que o modelo tem uma boa concordância com os dados experimentais, mas tende a subestimar os valores quando a U_{fi} empírica é maior que 0,20 m/s.

A adequação da nova correlação também foi avaliada por meio da comparação com a correlação de Tannous e Lourenço (2015), disposta na Tabela 3.4, a qual foi aplicada aos mesmos 54 dados empíricos usados no novo ajuste. A correlação das autoras levou a velocidades teóricas com ERMA de 23,47%, sendo este erro menor, mas comparável, ao da nova correlação (24,00%).

Figura 5.22 Comparação entre as velocidades de fluidização inicial empíricas e calculadas pela nova correlação



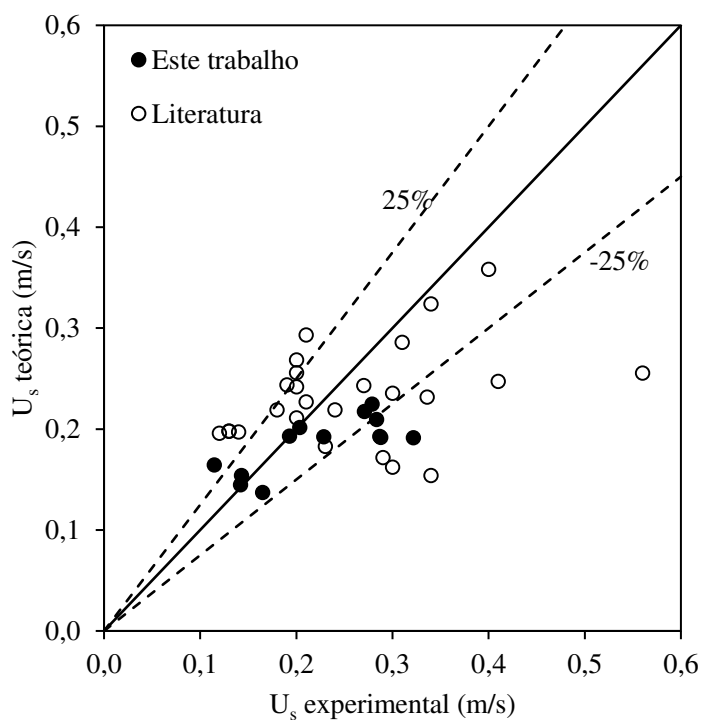
Para a velocidade de segregação, o ajuste foi feito considerando os dados experimentais desta dissertação e de Tannous e Lourenço (2015), totalizando 38 pontos. Novamente, apenas o modelo do tipo 2 resultou em uma correlação adequada. Os parâmetros do tipo 1 mais uma vez apresentaram valores negativos. Os modelos do tipo 3 e 4 foram considerados inadequados pela análise ANOVA por apresentarem F de significação $0,91 > 0,05$ e $0,18 > 0,05$, respectivamente.

A nova correlação para U_s está representada na Equação 5.24, cujo ERMA é de 26,41% e tem validade para $2,2 \times 10^3 < Ar_M < 1,2 \times 10^4$ e $2,36 < Re_s < 19,3$.

$$Re_s = 1,355 \times 10^{-3} Ar_M^{0,988} \quad (5.24)$$

Observa-se na Figura 5.23 que a correlação apresenta uma boa concordância com os dados. A aplicação da correlação de Tannous et al. (2018), descrita na Tabela 3.5, aos mesmos pontos empíricos resultou em um ERMA de 26,71%, comparável ao obtido pelo novo modelo.

Figura 5.23 Comparação entre as velocidades de segregação empíricas e calculadas pela nova correlação



6. CONCLUSÕES

Mediante o exposto neste trabalho pode-se concluir que:

- a) O estudo do comportamento fluidodinâmico das misturas de palha de milho e areia permitiu a identificação de quatro comportamentos fluidodinâmicos: leito fixo, segregação total, segregação parcial e mistura completa;
- b) A razão de fração mássica teve influência mais expressiva nas velocidades características para os maiores diâmetros de biomassa ($d_{p,b} = 0,496$ e $0,962$ mm), porque amplifica a heterogeneidade do leito;
- c) A razão de diâmetro teve maior influência nas velocidades características somente entre 0,76 a 1,48, devido a maior separação dos materiais;
- d) Recomenda-se trabalhar com velocidades acima da de fluidização completa para evitar os problemas associados a separação dos materiais;
- e) A porosidade de fluidização aparente (ϵ_{fa}) foi mais influenciada pelo aumento da razão de fração mássica, com aumento máximo de 40%, pois a maior quantidade de biomassa leva a uma maior segregação e formação de espaços vazios;
- f) Uma menor variação da porosidade de fluidização completa (ϵ_{fc}) foi observada para o maior diâmetro de biomassa quando comparada aos demais tamanhos (aumento máximo de 3% entre 2,5-m% e 12,5 m-% da razão de fração mássica e $d_{p,b} = 0,962$ mm), corroborando com a menor variação da velocidade de fluidização completa nesta mesma situação;
- g) Correlações empíricas foram propostas para o cálculo das velocidades características de fluidização, considerando dados experimentais desta dissertação e da literatura. As equações e os erros relativos médios absolutos correspondentes estão dispostos a seguir.

Para a **velocidade de fluidização inicial**, com ERMA = 24,00 %:

$$Re_{fi} = 3,11 \times 10^{-3} Ar_M^{0,819}$$

Para a **velocidade de fluidização aparente**, com ERMA = 21,22 %:

$$Re_{fa} = \frac{Ar_M}{986 + 11,6\sqrt{Ar_M}}$$

Para a **velocidade de segregação**, com ERMA = 26,41%:

$$Re_s = 1,355 \times 10^{-3} Ar_M^{0,988}$$

Para a **velocidade de fluidização completa**, com ERMA = 30,10%:

$$Re_{fc} = 2,79 \times 10^{-4} Ar_M^{1,254}$$

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da esfericidade por meio da metodologia de análise de partículas por difração de raio x, para validação dos resultados obtidos
- Ensaio da mistura de palha de milho e areia em um leito com aquecimento, para a identificação dos parâmetros de transferência de calor
- Avaliação térmica da palha de milho para caracterização de parâmetros como o poder calorífico, calor específico, teor de umidade, voláteis, e carbono fixo
- Ensaio em leitos de maior escala e associados a aplicações mais específicas, como torrefação e pirólise, para validação do estudo desenvolvido em escala laboratorial e ajuste a nova escala.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÁNEZ, J.; ABANADES, J. C. Minimum fluidization velocities of fluidized-bed coal-combustion solids. **Powder Technology**, v. 67, n. 2, p. 113–119, 1991.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Matriz de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 13/11/2018.

ANANTHARAMAN, A.; COCCO, R. A.; WEI, J. Evaluation of correlations for minimum fluidization velocity (Umf) in gas-solid fluidization. **Powder Technology**, v. 323, p. 454–485, 2018.

ARORA, K.; LICHT, M.; LEIBOLD, K. Industrial Corn Stover Harvest. **Next-Generation Biofuels: Near-Term Challenges and Implications for Agriculture, Economic Research Service**, p. 1–11, 2014. Disponível em: <<https://store.extension.iastate.edu/product/Industrial-Corn-Stover-Harvest>>. Acesso em 2 set. 2017.

BASU, P. Introduction. In: _____. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 3. ed. Academic Press, 2018. cap. 1. p. 2-28.

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. Data Analysis. In: _____. **Random Data - Analysis and Measurement Procedures**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010. cap. 11. p. 359-374.

BI, H. T.; GRACE, J. R. Flow Regime Diagrams for Gas-solid Fluidization and Upward Transport. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 21, n. 6, p. 1229–1236, 1995.

BILBAO, R.; LEZAUN, J.; ABANADES, J. C. Fluidization velocities of sand/straw binary mixtures. **Powder Technology**, v. 52, n. 1, p. 1–6, 1987.

BRACHI, P.; MICCIO, F.; MICCIO, M.; RUOPPOLO, G. Torrefaction of Tomato Peel Residues in a Fluidized Bed of Inert Particles and a Fixed-Bed Reactor. **Energy and Fuels**, v. 30, n. 6, p. 4858–4868, 2016.

BRAMMER, J. G.; BRIDGWATER, A. V. Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 3, p. 243–289, 1999.

CANADA, G. S.; MCLAUGHLIN, M. H.; STAUB, F. W. Flow regimes and void fraction in gas fluidization of large particles in beds without tube banks. **AIChE Symposium Series**, v. 74, n. 176, p. 14 – 26, 1978.

CHEUNG, L.; NIENOW, A. W.; ROWE, P. N. Minimum fluidisation velocity of a binary mixture of different sized particles. **Chemical Engineering Science**, v. 29, n. 5, p. 1301–1303, 1974.

CHEW, J. J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 4212–4222, 2011.

CHIBA, S.; CHIBA, T.; NIENOW, A. W.; KOBAYASHI, H. The minimum fluidisation velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures. **Powder Technology**, v. 22, n. 2, p. 255–269, 1979.

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

CORTEZ, L. A. B.; GOMEZ, E. O.; LORA, E. E. S. Caracterização da Biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2014. cap. 2. p. 31-47.

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

CURRAY, J. K. **Analysis of sphericity and roudness of quartz grains**, 1951. Dissertação (Mestrado). Pensylvania State University.

DHUNGANA, A.; BASU, P.; DUTTA, A. Effects of Reactor Design on the Torrefaction of Biomass. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 134, p. 1–11, 2012.

ELIAERS, P.; DE WILDE, J. Drying of Biomass Particles: Experimental Study and Comparison of the Performance of a Conventional Fluidized Bed and a Rotating Fluidized Bed in a Static Geometry. **Drying Technology**, v. 31, n. 2, p. 236–245, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Milho: Informações Técnicas**. 1.ed. Dourados: EMBRAPA, 1991. cap. 1. p. 13-34.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Inventário Energético de Resíduos Rurais**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. 1. ed. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

FAGERNÄS, L.; BRAMMER, J.; WILÉN, C.; LAUER, M.; VERHOEFF, F. Drying of biomass for second generation synfuel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 9, p. 1267–1277, 2010.

FELIPE, C. A. S. **Identificação e monitoramento de regime fluidodinâmico em leitos fluidizados gás-sólido**, 2004. 242 p. Tese (Doutorado). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

FORMISANI, B. Packing and fluidization properties of binary mixtures of spherical particles. **Powder Technology**, v. 66, n. 3, p. 259–264, 1991.

FORMISANI, B.; GIRIMONTE, R.; T., L. The Fluidization Pattern of Density-Segregating Two-Solid Beds. ECI Conference on The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering. **Anais...** . p.209–216, 2007. Vancouver, Canada: ECI Symposium Series.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Apêndice B: Descrição de Sólidos Particulados. In: _____. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1982. Apêndice B. p. 617-631.

GAUTHIER, D.; ZERGUERRAS, S.; FLAMANT, G. Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization. **Chemical Engineering Journal**, v. 74, n. 3, p. 181–196, 1999.

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, v. 7, n. 5, p. 285–292, 1973.

GELDART, D. Single particles, Fixed and Quiescent Beds. In: _____. **Gas Fluidization Technology**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1986. cap. 2. p. 11-32.

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. **Powder Technology**, v. 58, n. 1, p. 63–70, 1989.

HE, H.; LU, X.; SHUANG, W.; et al. Statistical and frequency analysis of the pressure fluctuation in a fluidized bed of non-spherical particles. **Particuology**, v. 16, p. 178–186, 2014.

HIGH LEVEL PANEL OF EXPERTS ON FOOD SECURITY AND NUTRITION (HLPE). **Biofuels and Food Security**. Rome, 2013. Disponível em: <<http://www.fao.org/cfs/cfs-hlpe/reports/report-5-biofuels-and-food-security-report-elaboration-process/pt/>>. Acesso em 15 jun. 2018.

JAIBOON, O. A.; CHALERMSINSUWAN, B.; MEKASUT, L.; PIUMSOMBOON, P. Effect of flow pattern on power spectral density of pressure fluctuation in various fluidization regimes. **Powder Technology**, v. 233, p. 215–226, 2013.

JOHNSSON, F.; ZIJERVELD, R. .; SCHOUTEN, J. .; VAN DEN BLEEK, C. .; LECKNER, B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, n. 4, p. 663–715, 2000.

KARMAKAR, M. K.; HALDAR, S.; CHATTERJEE, P. K. Studies on Fluidization Behavior os Sand and Biomass Mixtures. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. ICERTSD 2013, p. 1–6, 2013.

KOOPMANS, A.; KOPPEJAN, J. Agricultural and forest residues - Generation, utilization and availability. Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy. **Anais...** p.23, 1997. Bangkok: FAO Regional Wood Energy Development Programme.

KUMORO, A. C.; NASUTION, D. A.; CIFRIADI, A.; PURBASARI, A.; FALAAH, A. F. A New Correlation for the Prediction of Minimum Fluidization of Sand and Irregularly Shape Biomass Mixtures in a Bubbling Fluidized Bed. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 9, n. 23, p. 21561–21573, 2014.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. Fluidization and Mapping of Regimes. In: _____. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. cap. 3. p. 61-94.

LEE, G. S.; KIM, S. D. Pressure Fluctuations in Turbulent Fluidized Bed. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 21, n. 5, p. 515–520, 1988.

LIRAG, R. C. J.; LITTMAN, H. Statistical Study of the Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed. **AIChE symposium series**, v. 67, n. 116, p. 11–22, 1971.

LIU, Y.; KANSHA, Y.; ISHIZUKA, M.; FU, Q.; TSUTSUMI, A. Experimental and simulation investigations on self-heat recuperative fluidized bed dryer for biomass drying with superheated steam. **Fuel Processing Technology**, v. 136, p. 79–86, 2015.

LIU, Y.; PENG, J.; KANSHA, Y.; et al. Novel fluidized bed dryer for biomass drying. **Fuel Processing Technology**, v. 122, p. 170–175, 2014.

LOURENÇO, J. B. **Estudo das características fluidodinâmicas de misturas da madeira de eucalipto e do caroço do fruto do tucumã com inerte visando aplicação em processos de termoconversão**, 2012. 174 p. Dissertação (Mestrado). Campinas: Univesidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

MANDØ, M.; ROSENDAHL, L. On the motion of non-spherical particles at high Reynolds number. **Powder Technology**, v. 202, n. 1–3, p. 1–13, 2010.

MASSARANI, G.; PEÇANHA, R. P. Dimensão característica e formas de partículas. XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. **Anais...** . p.303–312, 1986. Campinas, SP.

DE MITRI, A. G.; LOURENÇO, J. B.; TANNOUS, K. Comportamento Fluidodinâmico e Velocidades Características de Misturas Binárias de Biomassa (*Cariniana legalis*) e Areia. XXXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. **Anais...** . p.100–109, 2011. Vassouras, RJ.

MOURAD, M.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. Hydrodynamique d'un séchoir à lit fluidisé a flottation: Détermination des vitesses caractéristiques de fluidisation de mélanges de maïs et de sable. **Powder Technology**, v. 80, n. 1, p. 45–54, 1994.

NAKAMURA, M.; HAMADA, Y.; TOYAMA, S.; FOUUDA, A. E.; CAPES, C. E. An experimental investigation of minimum fluidization velocity at elevated temperatures and pressures. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 63, n. 1, p. 8–13, 1985.

NODA, K.; UCHIDA, S.; MAKINO, T.; KAMO, H. Minimum fluidization velocity of binary mixture of particles with large size ratio. **Powder Technology**, v. 46, n. 2–3, p. 149–154, 1986.

OLIPHANT, T. E. **NumPy Reference**. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/index.html>>. Acesso em: 22 set. 2019.

OLIVEIRA, C. R. M. DE; TANNOUS, K. Fluidodinâmica de biomassa em leito fluidizado gasoso. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. **Anais...** . p.2–6, 2009. Uberlândia, MG: CD-ROM.

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: Process Intensification**, v. 72, p. 113–121, 2013.

VAN OMMEN, J. R.; SASIC, S.; VAN DER SCHAAF, J.; et al. Time-series analysis of pressure fluctuations in gas–solid fluidized beds – A review. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 37, n. 5, p. 403–428, 2010.

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

PÉCORÁ, A. A. B.; ÁVILA, I.; LIRA, C. S.; CRUZ, G.; CRNKOVIC, P. M. Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical-chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p. 188–197, 2014.

PÉREZ, N. P.; PEDROSO, D. T.; MACHIN, E. B.; et al. Fluid dynamic study of mixtures of sugarcane bagasse and sand particles: Minimum fluidization velocity. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 135–149, 2017.

PITSUKHA, E. A.; TEPLITSKII, Y. S.; BUCHILKO, É. K. Characteristic features of fluidization of bidisperse beds in suffosion conditions. **Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, v. 90, n. 6, 2017.

R. RAO, T.; RAM. BHEEMARASETTI, J. V. Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands. **Energy**, v. 26, n. 6, p. 633–644, 2001.

RASUL, M. G. Fluidization Characteristics of Bagasse in a Gas-Fluidized Bed. **Particle and Particle Systems Characterization**, v. 15, n. 5, p. 243–247, 1998.

RILEY, N. A. Projection Sphericity. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 11, n. 2, p. 94–97, 1941.

ROSSUM, G. VAN. **Python 3 Reference Manual**. Disponível em: <<https://docs.python.org/3.7/>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

ROWE, P. N.; NIENOW, A. W. Particle mixing and segregation in gas fluidised beds. A review. **Powder Technology**, v. 15, n. 2, p. 141–147, 1976.

ROWE, P. N.; NIENOW, A. W.; AGBIM, A. J. A Preliminary Quantitative Study of Particle Segregation in a Gas Fluidized Beds-Binary Systems of Near Spherical Particles. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 50, p. 324–333, 1972.

SANTOS, E. S. DOS. **Estudo dos Fenômenos de Mistura e Segregação em Leitos Fluidizados de Partículas Polidispersas**, 1997. 185 p. Dissertação (Mestrado). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

SASIC, S.; LECKNER, B.; JOHNSON, F. Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 5, p. 453–496, 2007.

SI, C.; GUO, Q. Fluidization Characteristics of Binary Mixtures of Biomass and Quartz Sand in an Acoustic Fluidized Bed. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 23, p. 9773–9782, 2008.

SILVA, F. S.; TANNOUS, K. Particle Shape Analysis Using Digital Image Processing. In: KHOSROW-POUR, D. B. A. M. (Org.). **Encyclopedia of Information Science and Technology**, 4. ed. Hershey, PA: IGI Global, 2017, v. II, p. 1331-1343.

TANNOUS, K.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. Hydrodynamic characteristics of fluidized beds containing large polydispersed particles. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 15, n. 1, p. 67–76, 1998.

TANNOUS, K.; LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; GRACE, J. R. Physical Properties for Flow Characterization of Ground Biomass from Douglas Fir Wood Physical Properties for Flow Characterization of Ground Biomass from Douglas Fir Wood. **Particulate Science and Technology**, v. 31, n. 3, p. 291–300, 2013.

TANNOUS, K.; LOURENÇO, J. B. Fluid Dynamic and Mixing Characteristics of Biomass Particles in Fluidized Beds. In: TANNOUS, K. (Org.). **Innovative Solutions in Fluid-Particle Systems and Renewable Energy Management**. 1. ed. Hershey: Engineering Science Reference, 2015. cap. 3. p. 54-91.

TANNOUS, K.; DE MITRI, A. G.; MIZONOV, V. Experimental Study of Fluid Dynamic Behavior of Biomass Particles in Fluidized Beds: a Review. **Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology**, v. 61, n. 9–10, p. 4–14, 2018.

TANNOUS, K.; MIZONOV, V. Comportamento da Biomassa na Fluidodinâmica em Leitos Fluidizados Cônico e Cilíndrico. XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. **Anais...**, 2009. Campinas, SP: CD-ROM.

TANNOUS, K.; OLIVARES-GOMEZ, E.; A, S. Hydrodynamic behavior of binary mixtures of biomass and alumina in gas fluidized bed. Proceedings from , Tromso/NO, , 2008. 4th International Symposium Reliable Flow of Particulate Solids. **Anais...** . p.166–171, 2008. Tromso, NO: 4th International Symposium Reliable Flow of Particulate Solids.

THONGLIMP, V; HIQUILY, N.; LAGUERIE, C. Vitesse minimale de fluidisation et expansion des couches fluidisées par un gaz. **Powder Technology**, v. 38, n. 3, p. 233–253, 1984.

THONGLIMP, V.; HIQUILY, N.; LAGUERIE, C. Vitesse minimale de fluidisation et expansion des couches de mélanges de particules solides fluidisées par un gaz. **Powder Technology**, v. 39, n. 2, p. 223–239, 1984.

VASCONCELOS, D.; BATALHA, G.; PEREIRA, L. G.; PIRES, C. A. Fluidization of binary mixtures of sisal residue and sand: A new model for deriving the final fluidization velocity. **Particuology**, v. 40, p. 10–22, 2018.

VUOLO, J. H. Valor Médio e Desvio Padrão. In: _____. **Fundamentos da Teoria de Erros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1996. cap. 7. p. 95-112.

WADELL, H. Volume, Shape, and Roundness of Quartz Particles. **The Journal of Geology**, v. 43, n. 3, p. 250–280, 1935. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/30056250?seq=1#metadata_info_tab_contents>. Acesso em: 16 jul. 2018.

WU, X.; LI, K.; SONG, F.; ZHU, X. Fluidization Behavior of Biomass Particles and its Improvement in a Cold Visualized Fluidized Bed. **Bioresources**, v. 12, n. 2012, p. 3546–3559, 2017.

ZHANG, Y.; ZHONG, W.; JIN, B. Experimental and Theoretical Study on Fluidization of Stalk-Shaped Biomass Particle in a Fluidized Bed. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 9, p. 1–23, 2011.

ZHONG, W.; JIN, B.; ZHANG, Y.; WANG, X.; XIAO, R. Fluidization of Biomass Particles in a Gas -Solid Fluidized Bed. **Energy & Fuels**, v. 22, n. 12, p. 4170–4176, 2008.

ANEXO A - Estudo para a Moagem da Palha de Milho

A fim de otimizar a cominuição da palha de milho (Figura 4.1), um planejamento experimental do tipo fatorial completo 2^3 foi empregado considerando os fatores: massa de alimentação, tempo de moagem e número de passagens no moedor (item 4.2). As respostas avaliadas foram a distribuição granulométrica e o diâmetro médio de Sauter. Os valores considerados para cada nível dos fatores estão dispostos na Tabela A.1.

Tabela A.1 Níveis de cada fator avaliado no planejamento 2^3 .

Fator	-1	+1
Massa (g)	25	50
Tempo (min)	10	20
Número de passagens	2	3
Resposta:	Distribuição granulométrica Diâmetro médio de Sauter	

A matriz de planejamento resultante está disposta na Tabela A.2

Tabela A.2 Matriz de planejamento.

Ensaio	Massa (g)	Tempo (min)	Número de passagens
1	25	10	2
2	50	10	2
3	25	20	2
4	50	20	2
5	25	10	3
6	50	10	3
7	25	20	3
8	50	20	3

Para a determinação da distribuição granulométrica e do diâmetro médio de Sauter, uma amostra de 10 g do material moído foi peneirado utilizando-se o mesmo conjunto de peneiras na série Tyler descrito no item 4.2, a saber: 4, 6, 8, 10, 14, 20, 28, 35, 48, 65, 100 e 150, com diâmetros de abertura correspondentes a 4,75 mm, 3,35 mm, 2,36 mm, 1,70 mm, 1,18 mm, 0,850 mm, 0,600 mm, 0,425 mm, 0,300 mm, 0,212 mm, 0,150 mm e 0,106 mm.

As peneiras foram colocadas em um vibrador por um tempo de 10 min e amplitude de frequência igual a 9. Mediu-se a massa das peneiras antes e após a vibração, sendo a diferença de massa igual à quantidade de material retido na peneira. O diâmetro médio de Sauter foi então calculado conforme descrito no item 4.5.

A Figura A.0.1 mostra a distribuição granulométrica dos oito (8) ensaios realizados no planejamento experimental. Como o objetivo é identificar o ensaio que promove maior quantidade das frações de diâmetro médio próximos a 0,25 mm, 0,50 mm e 1,0 mm, os resultados correspondentes as peneiras com d_m igual à 0,256 mm e 0,513 mm e 1,02 mm foram colocados em destaque na Figura A.0.2.

Figura A.0.1 Distribuição granulométrica dos ensaios do planejamento

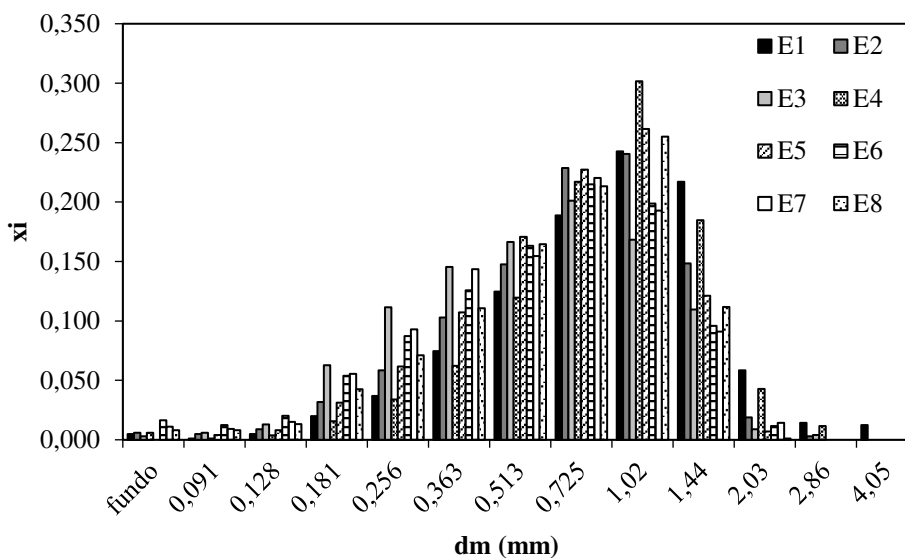
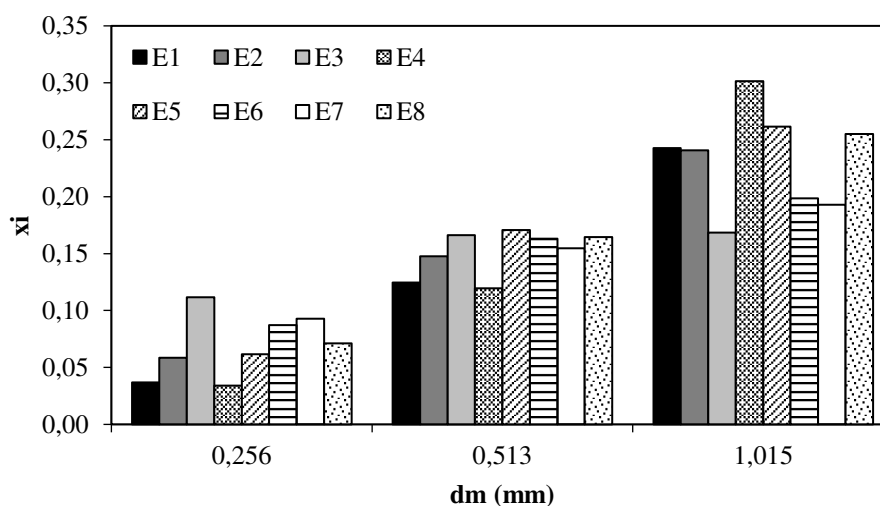


Figura A.0.2 Fração retida em cada ensaio nas peneiras com diâmetro de abertura de 0,256 mm, 0,513 mm e 1,02 mm



Verifica-se que o ensaio em que se obteve a maior quantidade de material com diâmetro de 1,02 mm foi o E4 (30,2%), com o diâmetro 0,513 mm foi o E5 (17,1%) e com o diâmetro 0,256 mm foi o E3.

Os resultados do diâmetro médio de Sauter encontram-se dispostos na Tabela A.3. A massa e o tempo de moagem não influenciaram os resultados, enquanto os ensaios com maior número de passagens no moedor (E5 a E8) apresentam menores \bar{d}_p . Assim se escolheram três (3) passagens no moinho como a condição de operação mais adequada para o processo.

Tabela A.3 Diâmetro médio de Sauter para cada ensaio do planejamento

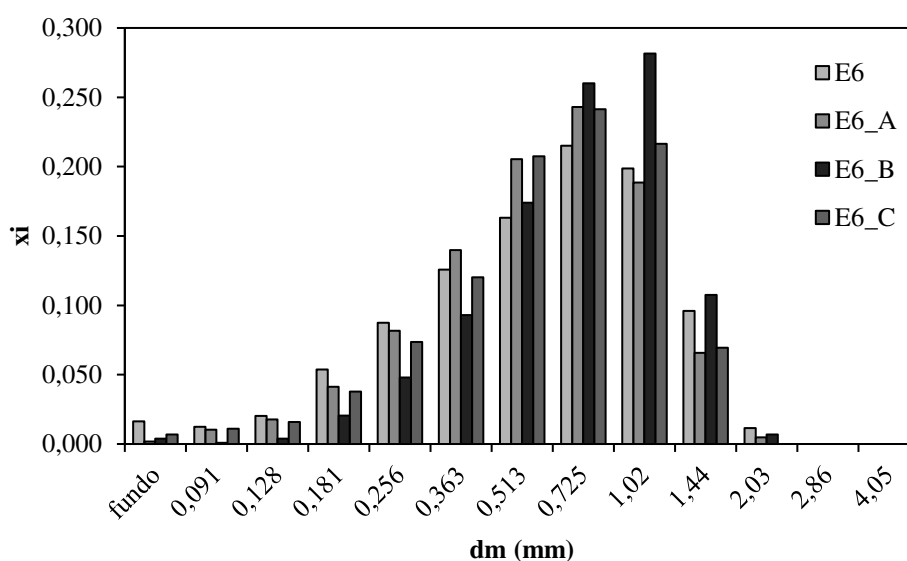
Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8
\bar{d}_p (mm)	0,696	0,566	0,454	0,707	0,553	0,462	0,465	0,511

De posse desta nova informação e considerando, verifica-se na Figura A.0.2 que o ensaio E6 apresentou quantidades razoáveis de material nos diâmetros selecionados, sendo 8,7% para o diâmetro de 0,256 mm, 16,3% para o diâmetro de 0,513 mm e 19,9% para o diâmetro 1,02 mm, resultando em uma quantidade total de 44,9%.

Assim, as condições de operação adotadas para a cominuição da palha de milho foram 50 g, 10 min e 3 passagens pelo moinho (ensaio E6), o qual resultou em um diâmetro de Sauter de 0,462 mm e frações adequadas de material nos diâmetros selecionados.

Após a escolha destas condições, foram realizados novos três ensaios para validação dos parâmetros de operação escolhidos (E6_A, E6_B e E6_C). A comparação da distribuição granulométrica destes resultados com os do ensaio 6 (melhor resultado do planejamento experimental) encontra-se na Figura A.0.3.

Figura A.0.3 Distribuição granulométrica do ensaio 6 (E6) e suas repetições (E6_A, E6_B e E6_C)



De forma geral, os ensaios E6_A e E6_C apresentaram a mesma tendência de distribuição granulométrica obtida no Ensaio 6. O ensaio E6_B apresentou resultados mais discrepantes. Na Tabela A.4 tem-se as porcentagens de massa obtidas para os diâmetros médios de peneira de interesse, bem como o diâmetro médio de Sauter de cada ensaio.

Tabela A.4 Frações retidas nos ensaios de repetição do Ensaio 6.

d_m (mm)	0,256	0,513	1,02	SOMA	\bar{d}_p (mm)
E6	8,5%	15,9%	19,4%	43,9%	0,462
E6_A	8,2%	20,5%	18,9%	47,6%	0,464
E6_B	4,8%	17,4%	28,2%	50,3%	0,605
E6_C	7,3%	20,8%	21,6%	49,8%	0,483
Desvio Padrão	1,7%	2,4%	4,3%	2,9%	0,069

Como pode ser visto na Tabela A.4, o desvio padrão entre os valores obtidos foi de 1,7% para o diâmetro de 0,256 mm, 2,4% para o diâmetro de 0,513 mm e 4,3% para o diâmetro médio de 1,02 mm. Além disso, o \bar{d}_p calculado tem um desvio padrão de 0,069 mm. O processo de moagem e peneiramento não são técnicas de elevada precisão, principalmente por conta do tipo de material a ser avaliado. A palha de milho, por exemplo, pode apresentar diferentes resistências mecânicas, de acordo com a espessura e tamanho das folhas e do teor de umidade do material. Assim, uma amostra com folhas maiores e mais espessas pode ter levado a um material com maiores tamanhos médios, enquanto uma amostra com folhas mais finas e pequenas resulta em um material moído com menor tamanho.

O material obtido apresentou partículas de formato retangular alongado, como um paralelepípedo retângulo. Se durante o peneiramento o material se deslocar através das peneiras verticalmente, ou seja, com o comprimento paralelo ao eixo de queda, este ficará retido na peneira que corresponde a uma abertura menor ou igual a sua largura. Entretanto, se o mesmo cair horizontalmente, com o comprimento perpendicular ao eixo de queda, ficará retido em uma peneira com abertura menor ou igual a este comprimento. Esta diferença está associada ao erro observado entre os diferentes ensaios (Tabela A.4).

Levando em consideração estes aspectos, as condições de moagem do Ensaio E6 (massa de 50 g, tempo de 10 min e 3 passagens pelo moinho) foram consideradas adequadas e foram aplicadas na moagem da palha de milho.

ANEXO B – Curva de Calibração do Transdutor de Pressão

Este anexo traz a forma experimental conduzida para a calibração do transdutor de pressão e inserção no equipamento *FieldLogger* para obtenção dos dados de pressão.

Medidas dos dados de queda de pressão (mmH₂O), mesurados por um manômetro de água, foram correlacionadas com a leitura da voltagem (V) transmitida para o módulo de aquisição de dados através do transdutor de pressão, realizada por um multímetro.

A Figura B.1 mostra a linearização dos dados obtidos. A equação de conversão está citada na Equação B.1, na qual ΔP_i representa a pressão entre dois pontos no leito, em Pa, e V a voltagem obtida pelo módulo, em volts.

$$\Delta P_i = 3650,3V + 3541,1 \quad (\text{B.1})$$

Figura B.1 Curva de calibração do transdutor de pressão diferencial - pressão diferencial em função da voltagem

