DEYBER ALEXANDER RAMIREZ QUINTERO

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL INERTE E DA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS CONTENDO AREIA E PARTÍCULAS DE BAMBU (*IN NATURA* E CARVÃO PRODUTO DO PROCESSO PIROLÍTICO) SOBRE A FLUIDODINÂMICA DE LEITOS FLUIDIZADOS

42/2015

CAMPINAS

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEYBER ALEXANDER RAMIREZ QUINTERO

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL INERTE E DA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS CONTENDO AREIA E PARTÍCULAS DE BAMBU (*IN NATURA* E CARVÃO PRODUTO DO PROCESSO PIROLÍTICO) SOBRE A FLUIDODINÂMICA DE LEITOS FLUIDIZADOS

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

Orientadora: Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDEÀ VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO DEYBER ALEXANDER RAMIREZ QUINTERO
E ORIENTADA PELA PROFa. DRa. ARAÍ AUGUSTA BERNÁRDEZ PÉCORA

.....

ASSINATURA DA ORIENTADORA

CAMPINAS

2015

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

Ramirez-Quintero, Deyber Alexander, 1985-
R145i Influência da granulometria do material inerte e da composição de misturas binárias contendo areia e partículas de bambu (in natura e carvão produto do processo pirolítico) sobre a fluidodinâmica de leitos fluidizados. / Deyber Alexander Ramirez Quintero. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Araí Augusta Bernárdez Pécora.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Misturas binárias. 2. Fluidização. 3. Biomassa - Aproveitamento. 4. Fluidodinâmica. 5. Bambu - Aplicações. I. Pécora, Araí Augusta Bernárdez,1959-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Influence of the granulometry of tinert material and of the composition of binary mixtures containing sand and bamboo particles (in natura and coal from pyrolysis process) on the hydrodynamics of fluidized beds.
Palavras-chave em inglês:
Binary mixtures
Fluidization
Biomass - Harnessing
Fluid
Bamboo - Applications
Área de concentração: Térmica e Fluidos
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora:
Araí Augusta Bernárdez Pécora [Orientador]
Sandra Cristina dos Santos Rocha
Osvaldir Pereira Taranto
Data de defesa: 27-02-2015
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL INERTE E DA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS BINÁRIAS CONTENDO AREIA E PARTÍCULAS DE BAMBU (IN NATURA E CARVÃO PRODUTO DO PROCESSO PIROLÍTICO) SOBRE A FLUIDODINÂMICA DE LEITOS FLUIDIZADOS

Autor: **Deyber Alexander Ramirez Quintero**
Orientador: **Araí Augusta Bernárdez Pécora**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

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

Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto
Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 27de fevereiro de 2015.

"Não há coisas eternas. Mas todas as coisas não surgem do nada, senão de outras coisas, transformadas, porque estás ao se transformarem não se tornam em nada; senão servem como material para coisas novas."

Heráclito de Éfeso (535 a.C. - 484 a.C.)

"Se as aparências das coisas coincidessem com a realidade, não haveria necessidade de ciência."

C. M. (1818 - 1883)

"Nossa consciência é apenas a imagem do mundo exterior, sua reflexão. Os fenômenos materiais existem fora de nós, enquanto seus reflexos, imagens do mundo exterior existe em nós [...] em nosso cérebro."

Vladimir Ilich Uliánov (1870 - 1924)

Agradecimentos

Este trabalho tem sido possível graças à contribuição que, durante o curso da minha vida, muitas pessoas fizeram para o desenvolvimento de minhas habilidades, conhecimentos e destrezas. Citá-las a todas seria uma tarefa tediosa, para o qual eu ofereço desculpas para muitas delas, pois mesmo que não foram listados também fazem parte importante da minha vida e deste trabalho.

Aos meus pais, Josué e Rubiela, quem me têm ensinado a importância da disciplina, esforço e focalização para tomar meu caminho na vida com honestidade. Igualmente a minha família, quem em todo momento tem estado me apoiando e acompanhando.

O Felipe Alfonso Pérez Romero quem após de muitos anos tem-me dado sua sábia direção, humana e ética, para tomar as decisões pessoais e profissionais mais adequadas para meu desenvolvimento individual.

À profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora por sua paciente orientação, grande dedicação e carismática guia durante todo o desenvolvimento do trabalho, além da oportunidade e ter dado sua confiança para eu desempenhá-lo.

Ao prof. Dr. Antônio Beraldo por ter compartilhado seus conhecimentos coletados depois de décadas de pesquisa sobre o bambu, além de fornecer sua ajuda para a obtenção e preparação da biomassa.

Ao povo brasileiro e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) quem através dos seus impostos e assinação de bolsas proveem os recursos econômicos para o desenvolvimento das pesquisas nas universidades públicas.

Aos técnicos do laboratório ProTea, pela ajuda na montagem do sistema experimental.

Ao Laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP por fornecer os equipamentos e ferramentas para a obtenção e preparação da biomassa com a qual fiz meu trabalho.

Ao laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LabMEV) da FEM.

Aos colegas de departamento pelos conselhos e sugestões.

Resumo

A aplicação de biomassas em processos de geração de energia como a combustão, pirólise e gaseificação, operando com a tecnologia de leito fluidizado, tem merecido atenção crescente nas últimas décadas. Esses sistemas necessitam da adição de partículas de material inerte que ajudam a promover uma fluidização estável, permitindo a melhoria da eficiência de tais processos. Dentre as biomassas com potencial para geração de energia sustentável está o bambu, material que apresenta propriedades semelhantes às de outras biomassas utilizadas em processos de geração de energia, com a vantagem de apresentar rápido crescimento, fácil propagação, regeneração vigorosa, maturidade rápida. O objetivo deste projeto foi estudar o comportamento fluidodinâmico de misturas de partículas de areia e bambu (*in natura* e na forma de carvão proveniente de processo de pirólise) visando à obtenção de parâmetros inerentes à fluidização dessas misturas, bem como analisar o efeito da degradação térmica da partícula de bambu sobre a fluidização do leito. A análise foi realizada a partir do levantamento experimental da curva fluidodinâmica em sistema de leito fluidizado operando a frio, com diferentes composições das misturas bambu-areia e carvão-areia. Adicionalmente foi verificada a influência do tamanho das partículas de areia e da altura estática do leito sobre a fluidodinâmica do leito. Os resultados mostraram que a melhor qualidade da fluidização do leito contendo partículas de bambu *in natura* foi obtida usando a areia identificada como areia 3 (diâmetro médio de 460 μm), relação entre a altura estática do leito e o diâmetro do leito igual à unidade (H/D = 1) e máximo teor de biomassa no leito igual a 5% (em massa). No entanto, esse tamanho areia não forneceu boas condições de fluidização para a mistura carvão-areia. A utilização da U_{mf} do material inerte para o projeto de reatores de pirólise, utilizando partículas de bambu como combustível, não é recomendável, uma vez que a presença de apenas 5 % (em massa) de bambu *in natura* aumenta o valor da U_{mf} em 20 %, enquanto que esse aumento é de 10 % no leito contendo carvão de bambu. Espera-se que os resultados obtidos neste estudo forneçam dados úteis para o projeto de reatores que utilizam a tecnologia de leito fluidizado. Pretende-se também contribuir para o entendimento da fluidodinâmica de sistemas que utilizam misturas de biomassas e areia para geração de energia.

Palavras chave: Misturas biomassa-areia, velocidade de mínima fluidização, fluidodinâmica da fluidização, *Dendrocalomus giganteus* Munro, carvão pirolítico de bambu, geração de energia.

Abstract

The use of biomass in power generation processes such as combustion, pyrolysis and gasification, operating with the fluidized bed technology, has received increasing attention in recent decades. These systems require the addition of inert particles to promote a stable fluidization, allowing the improvement of process efficiency. Among the biomasses with potential for sustainable power generation is bamboo, which presents similar properties to other biomasses used in energy generation processes, with the advantage of rapid growth, easy propagation, vigorous regeneration and quick maturity. In addition, its properties allow the recovery of environmentally degraded areas. The objective of this research was to study the hydrodynamics behavior of fluidized beds composed by mixtures of sand and bamboo particles (*in natura* and in the form of coal from pyrolysis process). Parameters inherent to fluidization of these mixtures, as well as the effect of thermal degradation on the fluidization process of bamboo particles are analysed. The analysis was performed from hydrodynamics curves obtained in an experimental system operating at room temperature, with different compositions of bamboo in nature and bio-char in the bed. Additionally, the influences of sand particle size and static bed height on the fluidized bed hydrodynamics were verified. Results showed that the best quality of fluidization of the studied mixtures was achieved using sand particles 460 μm diameter (sand 3), static bed height and column diameter ratio equal to unity (H/D = 1) and maximum weight fraction of bamboo in the bed equal to 5%. However, this size of sand particles did not provide a good quality of fluidization for coal-sand mixture. The U_{mf} of the inert material is not recommended to be used in the design of pyrolysis reactors as the addition of 5 wt% of bamboo *in natura* in the bed causes an increment of 20 % on U_{mf} while this increment is 10 % for the bed containing bamboo char. Results obtained from this study could provide useful data for the design of fluidized bed reactors that operate with bamboo particles. It is also intended to contribute on understanding the hydrodynamics behavior of fluidized beds using mixtures of biomass and sand for power generation.

Key words: Biomass-sand mixtures, minimum fluidizing velocity, hydrodynamics of fluidization, *Dendrocalomus giganteus Munro*, bio-coal from the pyrolysis process, power generation.

Lista de ilustrações

1.1	Distribuição geográfica do bambu lenhoso.	5
2.1	(a) Camada de *jetsam* perfurada por sucessivas bolhas que provocam a segregação do material para o fundo do leito, (b) *jetsam* depositado no fundo do leito sendo carregado para o topo pela ação de bolhas com velocidades elevadas.	9
2.2	Mapa mostrando a fluidização da mistura areia-palha de trigo em função da fração volumétrica de areia na mistura e dos diâmetros das partículas de biomassa e de areia.	10
2.3	Evolução da queda de pressão no leito em função da velocidade do gás: (1) leito fixo, (2) leito bem segregado, (3) parcialmente segregado e (4) bem misturado.	12
2.4	O processo da fluidização num leito contendo dois materiais diferentes.	16
2.5	O processo de mistura e segregação de mistura biomassa-areia em função da velocidade do gás.	18
2.6	Partes do bambu.	27
2.7	Número de gêneros e espécies nos países da América Latina.	28
2.8	Croqui da distribuição geográfica do bambu no Brasil.	29
2.9	Oferta de energia interna no Brasil em 2006.	30
3.1	(a) Cultivo de bambu na Faculdade de Agrícola da Unicamp, (b) colmos de bambu após do corte, (c) bambu cortado em discos, (d) bambu cortado em cubos e (e) bambu moído.	34
3.2	Esquema do reator de pirólise.	34
3.3	Carvão produto do processo pirolítico.	35
3.4	Inclinação m da reta ajustada para o leito fixo na curva fluidodinâmica ΔP_L vs U_O.	39
3.5	Diagrama esquemático do sistema experimental.	40
3.6	Diagrama esquemático do leito fluidizado.	42
3.7	Distribuidor de gás tipo placa porosa apoiada sobre o flange.	43
3.8	Curva característica da queda de pressão no distribuidor de tipo placa porosa	43
3.9	Transdutor de pressão SMAR modelo LD 301D.	44

3.10	Diagrama de conexão do transdutor de pressão SMAR modelo LD301D.	45
3.11	Transdutor de pressão SMART LD301D conectado ao sistema experimental.	45
3.12	Instrumentação para medida das condições internas do laboratório (barômetro de Torricelli, teramômetros de bulbo seco e de bulbo úmido).	46
3.13	Sistema de aquisição de sinais do transdutor.	47
3.14	Mistura binária carregada no leito antes de iniciar o teste.	49
3.15	Curva fluidodinâmico da mistura binária 5% bambu e 95% de areia 3.	50
4.1	Fotografias dos materiais utilizados nesta pesquisa: cinco tamanhos de areia, bambu moído *in natura* e carvão de bambu oriundo de processo de pirólise lenta à 500 ºC.	54
4.2	Distribuição granulométrica do bambu *in natura.*	54
4.3	Distribuição granulométrica do carvão de bambu.	55
4.4	Imagens do leito de bambu *in natura* (a) e carvão de bambu (b) em função da velocidade superficial do gás.	55
4.5	Classificação das partículas estudadas segundo Geldart (1973)	57
4.6	Imagens do leito composto apenas pela areia mais grossa (areia 5, $\overline{d_p}$ = 920 µm, *H/D* = 1).	58
4.7	Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 5 ($\overline{d_p}$ = 920 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).	59
4.8	Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 4 ($\overline{d_p}$ = 653 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).	59
4.9	Imagens do leito contendo a mistura binária 95% da areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).	60
4.10	Imagens do leito contendo a mistura binária 95% da areia 2 ($\overline{d_p}$ = 324 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).	61
4.11	Imagens do leito contendo a mistura binária 95% da areia 1 ($\overline{d_p}$ = 231 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).	61
4.12	Curvas fluidodinâmicas para os cinco diferentes tamanhos de areias testados e para as misturas binárias contendo 95% de areia e 5% de bambu *in natura*, (*H/D* = 1).	62
4.13	Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} em função do (a) dp_{areia} e da (b) relação $dp_{biomassa}/dp_{areia}$	64

em misturas binárias com 95% de areia e 5% de bambu *in natura*.

4.14 Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1,5). 66

4.15 Imagens dos canais preferencias no teste fluidodinâmico da mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 µm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1,5). 66

4.16 Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 2). 67

4.17 Curvas fluidodinâmicas para três relações *H/D* com a mistura binária composta por 5% de bambu in natura e 95% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm). 67

4.18 Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} em função da relação *H/D* em misturas binárias. 68

4.19 Imagens do leito contendo a mistura binária 97,5% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 2,5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1). 70

4.20 Imagens do leito contendo a mistura binária 92,5% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 7,5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1). 71

4.21 Imagens do leito contendo a mistura binária 90% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 10% de bambu *in natura* (*H/D* = 1). 72

4.22 Curvas fluidodinâmicas para diferentes composições do leito em misturas binárias areia-bambu *in natura*. 72

4.23 Imagens do leito contendo a mistura binária 97,5% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 2,5% de carvão (*H/D* = 1). 73

4.24 Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 5% de carvão (*H/D* = 1). 74

4.25 Imagens do leito contendo a mistura binária 92,5% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 7,5% de carvão (*H/D* = 1). 75

4.26 Imagens do leito contendo a mistura binária 90% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 10% de carvão (*H/D* = 1). 75

4.27 Curvas fluidodinâmicas para diferentes composições do leito em misturas binárias areia-carvão. 76

4.28 Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} em função da porcentagem da biomassa no leito em misturas binárias (a) areia-bambu *in natura* e (b) areia-carvão, areia 3 77

($\overline{dp}$ = 460 μm) e *H/D* = 1.

4.29 Relação de velocidades U_{mf}/U_{fc} em função do percentual da biomassa em misturas (a) areia-bambu *in natura* e (b) areia-carvão. 81

4.30 U_{mf} para as misturas binárias contendo 95% de areia e 5% de bambu in natura em função do dp_{areia} – comparação com resultados previstos por correlações da literatura. 82

4.31 U_{mf} para diferentes composições do leito em misturas bambu in natura-areia 3 e os resultados previstos por correlações da literatura. 84

4.32 U_{mf} para diferentes composições do leito em misturas carvão-areia 3 e os resultados previstos por correlações da literatura. 85

Lista de tabelas

2.1	Correlações da literatura para estimar a U_{mf} de misturas binárias contendo biomassas.	21
2.2	Resumo dos critérios de análise e principais conclusões obtidas no estudo da fluidodinâmica de leitos fluidizados contendo misturas de partículas.	24
4.1	Características físicas dos materiais particulados.	56
4.2	Velocidade de mínima fluidização das areias estudadas.	62
4.3	Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} dos testes fluidodinâmicos para cinco tamanhos de areias em misturas binárias com 95% de areia e 5% de bambu *in natura*.	63
4.4	Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para a mistura binária composta por 5% de bambu *in natura* e 95% de areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) em função da relação *H/D*.	68
4.5	Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para diferentes composições do leito em misturas areia 3-bambu *in natura* ($\overline{d_p}$ = 460 μm, *H/D* = 1).	73
4.6	Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para diferentes composições do leito em misturas areia-carvão (areia 3 com $\overline{d_p}$ = 460 μm, *H/D* = 1).	76
4.7	Comparação entre os valores obtidos de U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para as misturas contendo bambu *in natura*-areia 3 e carvão de bambu-areia 3.	79
4.8	Desvios entre os valores da U_{mf} experimental e a U_{mf} obtida a partir das correlações indicadas na Tab. 2.1 para as misturas binárias contendo 95% de areia e 5% de bambu *in natura* em função do dp_{areia}.	82
4.9	Desvios entre os valores da U_{mf} experimental e a U_{mf} obtida a partir das correlações indicadas na Tab. 2.1 para as misturas contendo bambu *in natura*-areia 3 e carvão de bambu-areia 3.	84
4.10	Resultados dos valores da U_{mf} previstas por correlações da literatura para as misturas binárias contendo diferentes composições do leito em misturas bambu *in natura*-areia 3.	85

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras latinas

A	Área superficial	[m^2]
Ar	Número de Arquimedes	[-]
D	Diâmetro do leito	[m]
dp	Diâmetro da partícula	[m]
dp_i	Diâmetro da partícula retida na peneira i	[m]
dp_o	Diâmetro da partícula correspondente à fração mássica acumulativa de 0,63	[m]
H	Altura do leito	[m]
h	Comprimento da partícula	[m]
im	Índice de dispersão	[-]
m	Massa de partículas	[kg]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[Pa]
P_{mont}	Pressão à montante da placa de orifício	[Pa]
Ra	Constante universal dos gases ideias	[J/kg.K]
Re	Número de Reynolds, $Re = \frac{\rho\, U_0\, dp}{\mu}$	[-]
U_{fi}	Velocidade do início da fluidização	[m/s]
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
U_{fc}	Velocidade de fluidização completa	[m/s]
U_o	Velocidade superficial do gás	[m/s]
U_s	Velocidade de segregação	[m/s]
V	Volume das partículas	[m^3]
w	Peso das partículas	[N]
x	Fração em massa	[-]

Letras gregas

α	Fração volumétrica	[-]
γ	Produto da esfericidade pelo diâmetro das partículas	[m]
ΔP	Queda de pressão	[Pa]
ε	Porosidade do leito de partículas	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do gás	[kg / m s]
ρ	Massa específica	[kg/m^3]
σ	Desvio padrão, $\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum(y_i - \bar{y})^2}$	
ϕ	Esfericidade	[-]

Subscritos

a	Ar
ap	Aparente
d	Distribuidor de gás (placa porosa)
e	Esfera
eff	Efetivo
g	Gás
L	Leito
LF	Leito fixo
M	Mistura
mf	Mínima fluidização
or	Medidor de placa de orifício
p	Partícula
s	Solido

Siglas

C	Separador ciclônico tipo Lapple
DE	Departamento de Energia
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
nf	Regime de fluidização borbulhante não foi alcançado
P	*Plenum*
PO	Medidor de vazão tipo placa de orifício
R	Coluna principal
ProTea	Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental
RBB	Rede Brasileira do Bambu
RRS	Rosin-Rammler-Sperling
SO	Soprador tipo roots
T	Temperatura
toe	Toneladas equivalentes de petróleo
V_1, V_2	Válvula de controle de vazão tipo globo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **1**

1.1. Justificativa e motivação à pesquisa 3

1.2. Objetivos 6

2. REVISÃO DA LITERATURA **7**

2.1. Fundamentos da fluidização 7

2.1.1. Fluidização de misturas de partículas com diferentes tamanhos e/ou densidades 8

2.2. A biomassa bambu 26

2.2.1. O bambu como recurso energético 30

3. MATERIAIS E MÉTODOS **33**

3.1. O bambu 33

3.2. Carvão de bambu resultante do processo de pirólise 34

3.3. Caracterização da biomassa 35

3.3.1. Tamanho das partículas 36

3.3.2. Massa específica aparente 37

3.3.3. Densidade e porosidade do leito empacotado naturalmente 37

3.3.4. Esfericidade do material particulado 38

3.4. Sistema experimental 40

3.4.1. Instrumentação 44

3.4.2. Sistema de aquisição de dados 46

3.5. Procedimento experimental 47

3.6. Avaliação do comportamento fluidodinâmico a partir das velocidades *Ufi*, *Umf* e *Ufc* obtidas 51

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES **53**

4.1. Caracterização do material 53

4.2. Influência do tamanho da areia na fluidização de misturas binárias biomassa-areia 58

4.3. Influência da altura do leito na fluidização de misturas binárias biomassa-areia 65

4.4. Influência da composição do leito na fluidização de misturas binárias areia-bambu *in natura* e areia-carvão 70

4.5. Comparação dos dados experimentais com as correlações da literatura 81
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES **87**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **89**
APÊNDICE A CÁLCULO DE VAZÃO POR MEIO DE PLACA DE ORIFÍCIO UTILIZANDO A NORMA ASME MFC-14M-2003 **97**
APÊNDICE B PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS **101**
APÊNDICE C MÉTODO PARA CÁLCULO DA MASSA DE CADA COMPONENTE NAS MISTURAS BINÁRIAS **103**
APÊNDICE D RESULTADOS DOS TESTES FLUIDODINÂMICOS **106**

1. INTRODUÇÃO

Os países de América Latina são os responsáveis por grande parte da produção agrícola do planeta, destacando-se o Brasil como o maior produtor do continente sul-americano (IEE-USP, 2012). Se, por um lado, tal desempenho coloca esses países entre os mais competitivos do mundo em termos agropecuários, de outro, aumenta, na mesma proporção, a quantidade de resíduos orgânicos gerados. Estes contribuirão para acelerar ainda mais a degradação do meio ambiente, caso não sejam destinados de forma consciente e sustentável. Dessa forma, a utilização desses resíduos em combustores, gaseificadores ou reatores de pirólise, apresenta-se como uma alternativa sustentável, além de produzir energia e compostos químicos para uso industrial.

As câmaras de combustão aplicadas a biomassas são predominantemente sistemas do tipo queima em grelha (*grate-fired*) ou sistemas de leito fluidizado (SUN *et al*., 2008). Segundo esses autores, os combustores tipo grelha eram as unidades mais versáteis em meados da década de 1980, mas os sistemas de leito fluidizado se tornaram sérios competidores desde a década de 1990. Os sistemas que usam a tecnologia de leito fluidizado apresentam vantagens como: flexibilidade na utilização de diferentes tipos de combustíveis, reduzida emissão de poluentes (NOx e SOx), menor temperatura de operação, maior eficiência de combustão e menor tamanho dos equipamentos (RAJI; OYEWOLA; SALAU, 2012; GANESAN; LINGAPPAN, 2013).

Gaseificadores e reatores de pirólise rápida também utilizam a tecnologia de leito fluidizado para a conversão de combustíveis sólidos em produtos com maior valor agregado (carvão vegetal, bio-óleo e gás). Tais reatores apresentam leitos fluidizados compostos pelo material combustível (biomassa, carvão, xisto, resíduos, etc.) e por um material inerte (areia, sílica, alumina, etc.) que representa em torno de 95% do material sólido presente no leito (BASU, 2006). O material inerte é responsável por manter o inventário de sólidos no reator e assegurar a uniformidade de temperatura no leito.

Bambu é uma biomassa que apresenta uma grande variedade de usos e tem sido intimamente associada com atividades da civilização humana desde tempos antigos. Atualmente, conta com uma ampla gama de aplicações nas áreas da Arquitetura, Engenharia Civil, Medicina,

na indústria Química, entre outras. Diferentes espécies de bambu crescem naturalmente no mundo e são utilizados como alimento humano, roupas, compostos medicinais, forragem animal, biomassa energética, material de construção para múltiplas finalidades, matéria prima para vários setores industriais (entre os quais, papel e celulose), artesanato, ferramentas, manufatura de móveis e instrumentos musicais (LONDOÑO, 1998; SCURLOCK, 2000; KAHLER, 2005; PEREIRA; BERALDO, 2007; RAMÓN, 2006).

A *Corporación de Investigación Tecnológica de Chile* (2003) e Ramón (2006) apresentaram dados indicando que no mundo mais de um milhão de pessoas vivem em casas de bambu. Relataram ainda que: na Índia, 20 milhões de pessoas participam nas diversas etapas produtivas derivadas da utilização do bambu; na China 5,6 milhões de pessoas são empregadas nas diferentes fases de geração dos produtos do bambu; a China produziu no ano de 2005 cerca de 350 toneladas de celulose a partir de bambu (1,5 % da produção mundial de papel); nas Filipinas o número de trabalhadores associados à pequenas empresas relacionadas ao bambu alcança 300.000 e na Tailândia 150.000. Neste último país a produção industrial do carvão de bambu tem promovido a criação de microempresas. Uma das principais empresas deste ramo abastece-se diariamente com 15.000 toneladas de bambu provenientes de 300 unidades de produção em pequenos povoados. Ramón (2006) comenta que no Brasil existem mais de 200.000 hectares de bambu para produção de papel e Taiwan exportou mais de US$50 milhões ao ano em bambu comestível. Dessa forma, a biomassa bambu contribui decisivamente na oferta de trabalho e favorece a distribuição de renda per capita mundial. Seu rápido crescimento, em relação a outras plantas, torna o bambu apropriado para o uso industrial, com baixo impacto ambiental. É uma das plantas que apresenta maior eficiência na fotossíntese do CO_2, podendo contribuir de forma significativa para a redução do efeito estufa, e ainda, prestar uma grande diversidade de serviços ambientais, como a recuperação de áreas ambientalmente degradadas, o controle da erosão e do assoreamento de corpos da água, enriquecimento físico e químico de solos, etc. (FIALHO; TONHOLO; DA SILVA, 2005; RAMÓN, 2006; PEREIRA; BERALDO, 2007). Segundo Ramón (2006) e Guarnetti (2007), trata-se da única espécie lenhosa que permite um usufruto contínuo e totalmente renovável. Logo, é uma cultura economicamente viável, ecologicamente correta e socialmente justa, constituindo um cultivo ideal para o desenvolvimento

rural, especialmente nos países em desenvolvimento. Desta forma, o bambu é visto como uma cultura energética com futuro promissor apresentando características importantes para aplicação como combustível: baixo teor de cinzas e poder calorífico considerável (ROUSSET *et al.,* 2011; FRYDA *et al.,* 2014).

Estudos realizados envolvendo o fenômeno de fluidização mostram a necessidade da realização de experimentos, tanto em bancadas a frio como em bancadas a quente, visando o levantamento de parâmetros de projeto de sistemas fluidizados. Tais parâmetros poderão posteriormente ser usados para a validação de simulações e dessa forma, servirem de parâmetros de referência para o ajuste dos coeficientes de influência nos modelos numéricos (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; YANG, 2003). Nesse sentido, este trabalho apresenta o estudo experimental do comportamento fluidodinâmico de misturas de areia com partículas de bambu (*in natura* e carvão proveniente de processo de pirólise) através da obtenção experimental das curvas fluidodinâmicas e determinação das velocidades inerentes ao processo de fluidização. Procurou-se verificar a influência do tamanho das partículas de areia, da altura do leito estático e da composição do leito sobre a fluidodinâmica do processo visando obter dados de projeto para sistemas que operam com misturas binárias bambu-areia em processos da geração de energia operando com a tecnologia da fluidização. Os resultados obtidos neste estudo pretendem complementar resultados de estudos anteriores envolvendo a fluidodinâmica de misturas biomassa-areia, além de verificar as alterações no comportamento do leito em função do processo de degradação térmica da biomassa.

1.1. Justificativa e motivação à pesquisa

A aplicação de biomassas em processos para geração de energia em leitos fluidizados de biomassas tem merecido atenção nas últimas décadas, entretanto verifica-se que elas não fluidizam facilmente, havendo a tendência de formação de canais preferenciais ou à formação de leitos pistonados devido à tendência de formar aglomerados. Isso ocorre, porque as partículas de

biomassa apresentam propriedades que afetam o comportamento dos processos de fluidização, como maior variação no tamanho e forma das partículas, e menor massa específica, dificultando assim, a fluidização desse material (ZHANG; JIN; ZHONG, 2009). Além desses fatores, a elevada umidade de biomassas contribui ao surgimento de comportamento não desejado em leitos fluidizados (CORTEZ; SILVA; OLIVARES, 2008).

O processo de fluidização de combustíveis sólidos utiliza, normalmente, um material particulado inerte (areia, na maior parte das vezes), cuja função é produzir uma fluidização mais estável, assegurar uma melhor distribuição do gás através do leito e manter o inventário quando processos reativos estão envolvidos (BASU, 2006). A sensível diferença entre o tamanho e a densidade das partículas de biomassa e do material inerte utilizado em combustores, gaseificadores ou reatores de pirólise contribui para a menor qualidade da fluidização e surgimento da segregação das partículas presentes no leito.

Também o tamanho e forma das partículas de biomassa e a composição do leito influenciam fortemente na fluidização, conforme verificado por diversos pesquisadores como Noda *et al.* (1986); Bilbao, Lezaun e Abanades (1987); Rao e Bheemarasetti (2001); Formisani, Girimonte e Longo (2008) entre outros.

Nos processos envolvendo fluidização de partículas sólidas é fundamental a obtenção de um elevado grau de mistura entre o material inerte e a biomassa, que são os materiais constituintes do leito de partículas no interior do reator (BASU, 2006; CAMARGO, 2006). O levantamento da curva fluidodinâmica de misturas biomassa-areia fornece informações importantes sobre parâmetros de projeto de um sistema que opera com leito fluidizado, tais como a velocidade de mínima fluidização e a verificação da qualidade da mistura entre a biomassa e o material inerte (GUO *et al.*, 2005).

A decomposição térmica de biomassas leva à produção de carvões vegetais**,** que apresentam composição, tamanho, forma e densidade diferentes das biomassas originais, fatores que afetam a fluidodinâmica do leito. Dessa forma, o levantamento da curva fluidodinâmica de misturas contendo carvão vegetal e areia permite verificar a variação do comportamento fluidodinâmico do leito após o processo de pirólise.

O uso racional dos recursos naturais é uma responsabilidade social que os pesquisadores,

em particular os da área de engenharia, têm com a sociedade. Essa responsabilidade acentua-se neste momento em que é grande a demanda pelo fornecimento de fontes energéticas sustentáveis economicamente e ambientalmente viáveis. Combustíveis gerados a partir das biomassas residuais apresentam-se como uma alternativa recomendada para substituição de combustíveis fósseis, que, embora tenha tido muita atenção nas últimas décadas, ainda apresenta diversos obstáculos e inconvenientes tecnológicos e econômicos para garantir sua utilização e aceitação no contexto industrial.

Segundo Soderstrom e Calderón, citados por Pellegrini (2008), plantações de diferentes espécies de bambu ocorrem naturalmente em todos os continentes, exceto na Europa. Distribuem-se desde 51º de latitude Norte (Japão) até 47º latitude Sul (Chile) e desde o nível do mar até 4300 metros de altitude, nos Andes equatorianos. A Fig. 1.1 apresenta a distribuição geográfica de bambus no mundo.

Figura 1.1. Distribuição geográfica do bambu lenhoso.
(http://www.eeob.iastate.edu/research/bamboo/maps/world-total-woody.gif, Terra, 2007).

Estudos envolvendo o bambu têm sido incentivados pelo governo do Brasil. Segundo o site da Presidência da República, a lei nº 12.484, de 8 de setembro de 2011, dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu e o edital MCTI/Ação Transversal/CNPq nº 66 (Estruturação da Rede Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Bambu) lançado em 2013 procuram estimular pesquisadores de instituições estaduais, federais ou privadas no desenvolvimento de estudos que tornem possível o uso desta matéria prima nos diferentes processos industriais.

1.2. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é o estudo fluidodinâmico de misturas binárias areia-bambu (*in natura* e carvão de bambu) através da avaliação do efeito do tamanho das partículas de material inerte, da composição da mistura e da altura estática do leito sobre a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}), velocidade do início da fluidização (U_{fi}) e velocidade da fluidização completa da mistura (U_{fc}). Com isso procura-se avaliar a qualidade da fluidização das misturas binárias analisadas e levantar dados úteis para o projeto de reatores aplicados aos processos para geração de energia que utilizam a tecnologia de leito fluidizado.

Como objetivos específicos da pesquisa estão:

- Caracterização física das partículas de bambu (*in natura* e carvão de bambu) e de diferentes tamanhos de partículas de areia;
- Realização de ensaios fluidodinâmicos para determinação do tamanho de partícula de areia a ser utilizado nos experimentos;
- Realização de ensaios fluidodinâmicos para determinação da altura do leito a ser utilizada nos experimentos;
- Definição das misturas a serem testadas (testes preliminares);
- Realização de ensaios fluidodinâmicos em sistemas de leito fluidizado com misturas binárias em escala laboratorial através do levantamento da curva fluidodinâmica para cada mistura estudada;
- Análise dos resultados obtidos visando verificar a influência do tamanho da areia, da composição da mistura e da altura estática do leito na fluidodinâmica do processo;
- Determinação das velocidades inerentes ao processo de fluidização de misturas binárias (U_{fi}, U_{mf} e U_{fc});
- Análise dos resultados obtidos e comparação com resultados da literatura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa como os fundamentos da fluidização e o comportamento de leitos fluidizados contendo misturas de partículas com diferentes tamanhos e/ou densidades. Adicionalmente, é apresentado um levantamento da literatura sobre as propriedades da biomassa bambu e sua utilização como fonte energética.

2.1. Fundamentos da fluidização

Quando se tem escoamento de um fluido dirigido de baixo para cima, através de uma massa de partículas estacionárias contidas num recipiente e suportadas por um distribuidor de gás, observa-se o aumento da queda de pressão através do leito com o aumento da velocidade superficial do gás. Em determinada velocidade, denominada velocidade de mínima fluidização (U_{mf}), observa-se o início da movimentação das partículas e a expansão de leito, fazendo com que a queda de pressão através do leito permaneça constante, igual ao peso das partículas por unidade de área transversal do leito (GELDART, 1986).

No processo de fluidização ocorre o movimento contínuo dos componentes do leito, o que traz muitas vantagens a diversos processos industriais que necessitam de um contato efetivo entre partículas e fluido, além de uniformidade de temperatura no reator. A área de contato entre o sólido e o fluido é muito grande e o mecanismo de formação de bolhas permite obter taxas elevadas de transferência de massa e de calor. Outra característica importante deste processo é a possibilidade de controlar o transporte dos sólidos dentro e fora do equipamento (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; BASU, 2006).

O leito fluidizado borbulhante consiste de um regime de fluidização compreendido entre a velocidade de mínimo aborbulhamento e a velocidade de transição para o regime turbulento,

caracterizado pela presença de bolhas que promovem a agitação do leito e crescem à medida que se afastam do distribuidor. Quando as bolhas atingem dimensões próximas ao diâmetro da coluna, o comportamento do leito torna-se instável com o surgimento de pistões de gás e grandes flutuações de pressão característico do regime de leito empistonado, o que prejudica a qualidade da fluidização.

Em função de suas características fluidodinâmicas que provocam elevadas eficiências de transferência de calor e de massa, diversos processos industriais que envolvem biomassas para geração de energia utilizam a tecnologia de leito fluidizado borbulhante. Dentre essas processos estão a combustão, a gaseificação e a pirólise, os quais utilizam um material inerte (areia, alumina ou cinzas) para promover a fluidização das partículas e manter o inventário de sólidos no reator (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; BASU, 2006).

2.1.1. Fluidização de misturas de partículas com diferentes tamanhos e/ou densidades

No âmbito das diferentes aplicações industriais da tecnologia da fluidização, é comum a presença de dois ou mais tipos de sólidos, onde uma ou mais das suas características apresentam diferenças físicas consideráveis (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; BASU, 2006).

Nas últimas décadas, diferentes pesquisadores estudaram a fluidodinâmica de leitos compostos por misturas de diferentes partículas procurando levantar dados sobre o fenômeno de fluidização envolvendo tais misturas. A seguir são apresentados, em ordem cronológica, alguns trabalhos que estudaram a fluidização de misturas:

O trabalho de Rowe e Nienow (1976) é um dos primeiros envolvendo o estudo do mecanismo de segregação em misturas binárias contendo partículas de diferentes tamanhos e densidades. Este trabalho apresenta uma revisão crítica de trabalhos realizados sobre esse assunto na University College London, onde foi introduzido o termo *flotsam* para se referir às partículas com tendência a flutuar e o termo *jetsam* para se referir às partículas com tendência a afundar. Os

autores analisaram o comportamento de segregação/mistura de uma mistura binária e mostraram a importância das bolhas no fenômeno de segregação. As fotografias mostradas na Fig. 2.1 mostram o componente *jetsam (cor preta),* inicialmente no topo do leito, sendo direcionado, parcialmente, para o fundo (Fig. 2.1a) ou para o topo (Fig. 2.1b) dependendo da velocidade das bolhas.

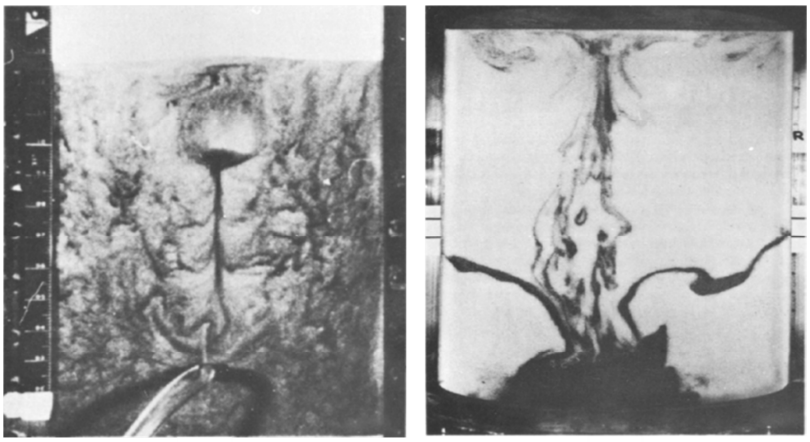


Figura 2.1. (a) Camada de *jetsam* perfurada por sucessivas bolhas que provocam a segregação do material para o fundo do leito, (b) *jetsam* depositado no fundo do leito sendo carregado para o topo pela ação de bolhas com velocidades elevadas.
(ROWE; NIENOW, 1976).

Segundo Rowe e Nienow (1976), a diferença de densidade das partículas é um fator que exerce maior influência sobre o grau de segregação do leito do que a diferença do tamanho. De acordo com os autores, é bem conhecido que uma grande variedade de tamanho de partícula pode ser tolerada num leito fluidizado sem que a segregação ocorra, enquanto que pequenas diferenças de densidade podem gerar segregação. Consideraram que, a partir dessa observação, um caso limite de concentração de *jetsam* pode ser determinada em aplicações como combustores de leito fluidifizado alimentados com carvão, contendo partículas de 2 cm e maiores. Tais leitos utilizam areia como material inerte e, neles, a concentração de carvão representa cerca de 5% da massa total do leito. O carvão deve ser bem disperso no leito e sua densidade é significativamente

menor do que a densidade do leito. Velocidades superiores à velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) da mistura produzem maiores flutuações do componente *flotsam* favorecendo a mistura entre os componentes. Mas em taxas moderadas de velocidade do gás no regime borbulhante, o *flotsam* é constantemente carregado à superfície ocorrendo a segregação do leito.

Bilbao, Lezaun e Abanades (1987) estudaram o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias compostas por palha de trigo (0,346 < dp < 1,788 mm, ρ_p = 350 kg/m^3) e areia previamente calcinada a 800 °C (0,158 < dp < 0,346 mm, ρ_p = 2100 kg/m^3). Determinaram a U_{mf} das misturas a partir da construção da curva fluidodinâmica da queda de pressão no leito (ΔP_L) em função da velocidade superficial do gás (U_o). Os autores verificaram a influência da fração volumétrica de areia na mistura (α_{areia}) em função do diâmetro de partícula da biomassa ($dp_{biomassa}$) para diferentes tamanhos da areia (dp_{areia}) ao construir a Fig. 2.2. Nesta figura, a região I indica as condições onde a fluidização borbulhante ocorre, enquanto a região II indica as condições em que a fluidização não foi observada. Seus resultados mostraram que as maiores partículas de biomassa exigem maior teor de areia na mistura para alcançarem o regime de leito fluidizado e que esse teor pode ser reduzido com a redução do tamanho das partículas de areia presentes no leito. Verificaram ainda que a U_{mf} decresce com a redução do tamanho e com o aumento do teor de areia na mistura.

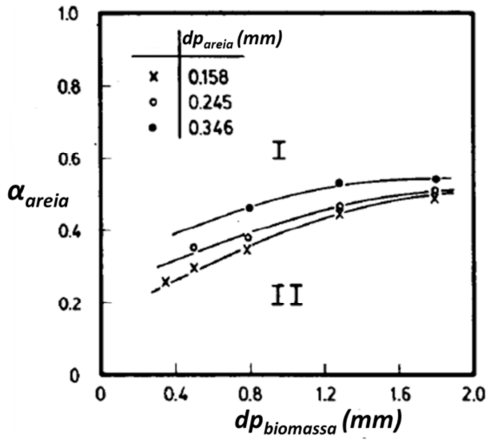


Figura 2.2. Mapa mostrando a fluidização da mistura areia-palha de trigo em função da fração volumétrica de areia na mistura e dos diâmetros das partículas de biomassa e de areia (adaptado de BILBAO; LEZAUN; ABANADES, 1987).

Kondukov e Sosna (1966) e Gelperin *et al.* (1967), citados por Chiang, Kuo e Chen (1989), estudaram a fluidodinâmica de misturas binárias e definiram a velocidade na qual as partículas finas ou leves começam a fluidizar como a velocidade de início de fluidização (U_{fi}) e a velocidade na qual as partículas maiores ou mais densas começam a fluidizar como velocidade de fluidização completa (U_{fc}). Esta última poderia ser considerada a velocidade real de mínima fluidização da mistura, pois somente a partir desta velocidade todo o leito encontra-se fluidizado.

Chiang, Kuo e Chen (1989) determinaram experimentalmente a U_{mf} de misturas binárias compostas por esferas de vidro ($610 < dp < 2810\ \mu m$) e partículas de ferro ($1000 < dp < 1560\ \mu m$) e compararam seus resultados com valores estimados através de correlações propostas em diferentes estudos, desenvolvidas para leitos compostos por sistemas monodispersos. Os autores usaram o método tradicional (curva fluidodinâmica da ΔP_L em função da U_o) para determinar U_{mf}. Uma das conclusões do trabalho foi que a aplicação das correlações da literatura não forneceram estimativas adequadas da U_{mf} das misturas testadas devido a não levarem em consideração a interação entre as partículas e as características do leito contendo as misturas.

Formisani (1991) estudou o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias de esferas de vidro de diferentes tamanhos ($153 < dp < 483\ \mu m$, $\rho_p = 2530$ kg/ m^3) em misturas binárias com frações de diâmetro ($dp_{jetsam}/dp_{flotsam}$) desde 1,4 até 2,8. Nos experimentos de Formisani (1991), para levantamento da curva fluidodinâmica da ΔP_L em função da U_o, a massa de partículas adicionada ao leito foi fixada, resultando em razão entre a altura estática do leito (H) e diâmetro do leito (D) ao redor de 1. Antes da medida de ΔP_L em função da U_o, Formisani assegurou que o leito estivesse bem misturado efetuando a fluidização vigorosa dos materiais presentes no leito por alguns minutos e em seguida efetuou o congelamento do leito para medida de sua altura média. Essa medida permitiu o cálculo da porosidade da mistura na condição de mínima fluidização (ε_{mf}). Seus resultados mostraram que a razão $dp_{jetsam}/dp_{flotsam}$ e a composição do leito afetaram o valor de ε_{mf} e de U_{mf} da mistura binária. Verificou ainda que a equação de Carman-Kozeny (Eq. 2.1) forneceu boa aproximação com os resultados experimentais desde que o valor de ε_{mf} da mistura seja obtido experimentalmente.

$$180\,\frac{U_0}{{d_{pM}}^2}\,U_{mf}\,\frac{\left(1-\varepsilon_{mf}\right)^2}{{\varepsilon_{mf}}^3}=\left(\rho_s-\rho_g\right)g(1-\varepsilon_{mf}) \tag{2.1}$$

Onde o diâmetro superficial-volumétrico da partícula (dp_M) que caracteriza a mistura é fornecido pela Eq. 2.2 em termos das frações em massa (x) e dp dos seus componentes.

$$\frac{1}{dp_M}=\frac{x_{flotsam}}{dp_{flotsam}}+\frac{x_{jetsam}}{dp_{jetsam}} \tag{2.2}$$

Na Eq. 2.1, g é a aceleração da gravidade, ρ_g e ρ_s são as densidades do fluido e das partículas, respectivamente.

Tannous, Hemati e Laguerie (1998) usaram areias tipo B e D segundo a classificação de Geldart para apresentar um estudo fluidodinâmico de leitos contendo partículas granulares polidispersas. Foram estudadas quatro misturas com os seguintes diâmetros médios: (i) $\overline{dp}$ =605 μm (450 < dp < 715); (ii) $\overline{d_p}=958\,\mu m$ (715 < dp < 1125); (iii) $\overline{d_p}=1555$ µm (1125 < dp < 1800); e (iv) $\overline{d_p}=2504\,\mu m$ (1800 < dp < 2825). Os autores analisaram o comportamento fluidodinâmico das misturas a partir da curva fluidodinâmica obtida no processo de fluidização e de defluidização das partículas (Fig. 2.3) com o leito inicialmente bem misturado.

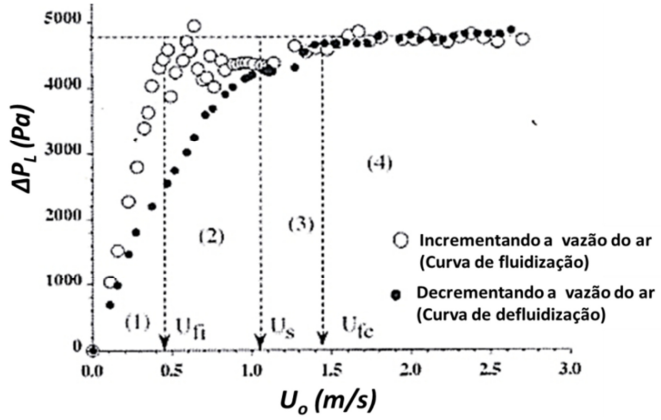


Figura 2.3. Evolução da queda de pressão no leito em função da velocidade do gás: (1) leito fixo, (2) leito bem segregado, (3) parcialmente segregado e (4) bem misturado (adaptado de TANNOUS; HEMATI; LAGUERIE, 1998).

Para as velocidades do ar entre a U_{fc} e a velocidade da segregação (U_s), os autores observaram uma redução da ΔP_L em relação ao valor correspondente ao peso do material por unidade de área transversal da coluna, tanto para a curva de fluidização quanto a curva de defluidização. Para velocidades do ar entre U_{fi} e U_s a ΔP_L oscilou quando a vazão do ar aumentava e diminuiu regularmente quando o fluxo do ar foi reduzido. Segundo os autores, essas oscilações da ΔP_L na curva de fluidização podem ser atribuídas a alterações na estrutura do leito devido ao arraste das partículas finas em direção à superfície do leito. Essas oscilações na ΔP_L desapareceram quando a velocidade do ar era menor que U_{fi}. Os resultados desse estudo mostraram que as velocidades U_{fi}, U_s e U_{fc} não foram influenciadas pelo diâmetro da coluna nem pela altura do leito estático. A partir do modelo de distribuição de Rosin-Rammler-Sperling (RRS) estudaram também o parâmetro demarcado como índice de dispersão (*im*) presente na Eq. (2.3), cujo aumento levou ao aumento da $U_{fi,}$ e à redução de U_{fc} e U_s. Como uma consequência, o intervalo da segregação (U_{fc} - U_{fi}) tende a ser menor com o aumento do índice de dispersão e com a redução do diâmetro médio das partículas.

$$F(dp_i) = 1 - e^{\left(-\frac{dp_i}{dp_o}\right)^m} \tag{2.3}$$

Onde $F(dp_i)$ representa a percentagem acumulativa de material retido na peneira i, dp_i é o tamanho da partícula retida na peneira i e dp_o é o tamanho de partícula correspondente à fração mássica acumulativa de 0,63.

Como comentado anteriormente a complexidade de prever as velocidades de fluidização nos leitos compostos por vários materiais deve-se ao grande número de fatores que podem afetar o processo. A variação entre os valores das velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} está estreitamente relacionada tanto à fração volumétrica (ou mássica) de cada componente presente na mistura como às propriedades das partículas (tamanho, esfericidade e densidade). Também a forma como as partículas estão arranjadas inicialmente e a geometria do leito podem afetar o comportamento da curva fluidodinâmica. As tentativas feitas para prever a velocidade de mínima fluidização de misturas de partículas com diferentes propriedades têm levado a algumas relações,

principalmente empíricas (BEECKMANS; STHL, 1987, TANNOUS; HEMATI; LAGUERIE, 1998; FORMISANI, DE CRISTOFARO; GIRIMONTE, 2001).

Rao e Bheemarasetti (2001) apresentaram um estudo fluidodinâmico de leitos compostos por biomassa-areia. Usaram misturas binárias compostas de areia (em duas densidades: 2500 e 2700 kg/m^3, e dois tamanhos de partículas: -600 +355 μm e -355 +250μm) e biomassa, variando a porcentagem em peso desta última em 2, 5, 10 e 15%, casca de arroz (2 mm de largura, 1 mm de espessura e 10 mm de comprimento), serragem (-1000 +800 μm) e casca de amendoim em pó (-1200 +800 μm). A mistura foi inicialmente bem misturada e levada ao regime de fluidização borbulhante e, seguidamente, diminuindo a vazão do ar, foram registrados os valores de pressão para a construção da curva fluidodinâmica ΔP_L vs U_o. A partir dos resultados obtidos, Rao e Bheemarasetti propuseram uma correlação para a U_{mf} das misturas binárias areia-biomassa, Eq. (2.4), em função do diâmetro efetivo da mistura (dp_{eff}) e da densidade efetiva da mistura (ρ_{eff}): gravidade (g) e viscosidade do gás (μ).

$$U_{mf} = \frac{{d_{peff}}^2(\rho_{eff}-\rho_g)g}{1650\,\mu} \tag{2.4}$$

Sendo g a aceleração da gravidade e μ a viscosidade dinâmica do gás.

O diâmetro efetivo foi definido como uma função da densidade da areia (ρ_{areia}), densidade da biomassa ($\rho_{biomassa}$), diâmetro das partículas de areia (dp_{areia}), diâmetro das partículas da biomassa ($dp_{biomassa}$), peso da areia (w_{areia}) e peso da biomassa ($w_{biomassa}$), conforme Eq. (2.5).

$${d_{peff}}^2 = k'\left\{dp_{areia}\left[\left(\frac{\rho_{areia}}{\rho_{biomassa}}\right)\left(\frac{dp_{biomassa}}{dp_{areia}}\right)\right]^{w_2/w_1}\right\}^2 \tag{2.5}$$

Por sua vez, ρ_{eff} foi definida através da Eq. (2.6):

$$\rho_{eff} = \frac{w_{areia}\rho_{areia}+w_{biomassa}\rho_{biomassa}}{w_{areia}+w_{biomassa}} \tag{2.6}$$

E o parâmetro k' foi relacionado com o tamanho de partícula da areia, [Eq. (2.7)].

$$k' = 20\ dp_{areia} + 0.36 \tag{2.7}$$

Segundo os resultados obtidos por Rao e Bheemarasetti, a equação desenvolvida para prever a U_{mf} das misturas binárias usadas no estudo estimou de forma satisfatória as U_{mf} dos leitos contendo as biomassas estudadas. Encontram também que as equações estimaram satisfatoriamente as U_{mf} para as misturas de partículas de mesma densidade, mas de tamanhos diferentes.

Formisani, De Cristofaro e Girimonte (2001) comentaram que não estava claro como e em que medida a teoria da fluidização desenvolvida para leitos monodispersos poderia ser adaptada para aplicação em sistema de múltiplos componentes. Segundo os autores, a maioria das correlações existentes para U_{mf} assumem que o leito encontra-se bem misturado inicialmente, ou seja, a condição homogênea é observada.

Em trabalho subsequente, Formisani, Girimonte e Longo (2008) comentaram que fatores como arraste das partículas finas e formação de canais preferenciais também afetam o comportamento da curva fluidodinâmica e que não estava totalmente claro se a ação das bolhas determina o equilíbrio da mistura-segregação ou está apenas dinamicamente sobreposta a ela. Consideraram que se o leito empacotado está segregado inicialmente, com as partículas mais leves na parte superior (Fig. 2.4b), a frente de fluidização, que se encontra na superfície que divide os materiais, começa a fluidizar o componente *jetsam*, à medida que avança em direção ao fundo do leito, provocando a sua mistura com o componente *flotsam*. Quando a velocidade superficial do gás atingiu U_{fc} observou-se uma mistura homogênea das partículas. Verificaram ainda que o valor de U_{fc} foi praticamente o mesmo observado no caso em que o leito estava inicialmente misturado (Fig. 2.4a).

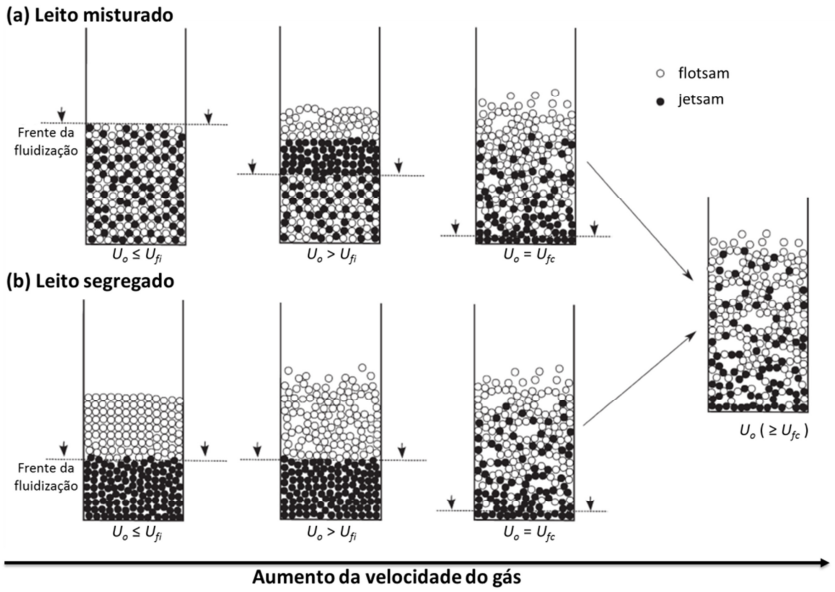


Figura 2.4. O processo da fluidização num leito contendo dois materiais diferentes (Adaptado de FORMISANI; GIRIMONTE; LONGO, 2008).

Embora ligeiramente idealizados, os dois padrões da Fig. 2.4 servem para tornar claro que a rota para o estado fluidizado de um sistema binário de partículas varia de acordo com a distribuição inicial dos diferentes componentes do leito fixo, de modo que também o equilíbrio da mistura-segregação alcançado em uma determinada velocidade de fluidização mantém memória do arranjo inicial dos dois sólidos (FORMISANI; GIRIMONTE; LONGO, 2008). Segundo esses autores, a segregação de um leito composto de dois sólidos é um processo gradual que não se restringe ao conceito de "velocidade de mínima fluidização". Comentaram que a aplicação do método para obtenção de U_{mf}, descrito para leitos com apenas um componente, resulta numa análise enganosa incapaz de entender algumas características essenciais do comportamento de sistemas binários ou multicomponentes. Propõem que uma alternativa para o estudo da fluidodinâmica de misturas binárias é a utilização da metodologia que define uma velocidade "inicial" e uma velocidade "final" de fluidização como os limites do intervalo da velocidade ao longo da qual o processo de fluidização ocorre. Seus resultados mostraram que U_{fi} e U_{fc} dependem da densidade, diâmetro e forma das partículas, além da composição da mistura. Verificaram ainda que o valor de U_{fi} de uma mistura binária depende da distribuição inicial dos

seus componentes no leito, enquanto que o valor de U_{fc} é praticamente insensível a esse fator. Também observaram que para o leito constituído por dois componentes com densidades diferentes, os fenômenos de fluidização e de mistura-segregação são mais complicados pelo efeito da redução da porosidade local, resultante da mistura dos dois sólidos, o que afeta, principalmente, o valor de U_{fc} que fica acima da U_{mf} do componente *jetsam* isolado.

Zhang, Jin e Zhong (2009) apresentaram um estudo do comportamento de mistura e segregação do leito em termos dos padrões de fluxo e perfil de concentração de sólidos na mistura. Os autores analisaram o comportamento da segregação dividindo o leito em camadas, as quais foram analisadas separadamente. Nos experimentos realizados por Zhang, Jin e Zhong (2009) foram retiradas amostras do leito, composto por misturas binárias de biomassa (dp = 5 mm, $\rho_p = 3853\ \mathrm{kg/m^3}$) e areia de quartzo ($dp = 0{,}5$ mm, $\rho_p = 2560\ \mathrm{kg/m^3}$), ao longo de sua altura variando a porcentagem em massa da biomassa ($x_{biomassa}$ = 1, 2 e 3%) e a razão entre altura e diâmetro do leito 0,79 <*H/D* <0,86. A U_{mf} de cada mistura estudada pelos pesquisadores foi obtida a partir da curva fluidodinâmica. Segundo os autores, diferentes velocidades do gás produzem diferentes graus de mistura e segregação em cada condição operacional estável, sendo que a mistura e a segregação tendem a ocorrer simultaneamente em diferentes partes do leito, havendo competição entre elas. Zhang, Jin e Zhong classificaram a rota do processo de mistura-segregação em dois estágios (baixa velocidade e alta de velocidade do gás), em relação à velocidade de mínima fluidização (Fig. 2.5). Quando o gás é introduzido através de um leito bem misturado (Fig. 2.5a), em determinado valor de velocidade do gás, parte da biomassa flutua no topo do leito levando à segregação local. À medida que a velocidade do gás é aumentada essa tendência é reforçada até que, um pouco antes do valor da U_{fc}, a camada totalmente segregada que contém quase exclusivamente a biomassa (componente *flotsam*) pode ser observada na superfície do leito. Como um resultado da segregação local, os autores comentaram que ocorria o desenvolvimento da segregação global. Verificaram ainda que, quando a mistura binária apresentava seus componentes inicialmente separados, logo que a velocidade do gás excedia a U_{mf}, ocorria a redução do estado segregado e o surgimento de uma mistura local na parte superior (Fig. 2.5b). O aumento progressivo da velocidade do gás gerava, juntamente com um aborbulhamento mais intenso, uma melhor mistura entre os dois componentes. No entanto,

observaram que ao aumentar ainda mais a velocidade do gás a biomassa era levada para o topo do leito, fato atribuído ao maior valor da força de arrasto sobre as partículas em relação à força de gravidade, fazendo com que o fenômeno de segregação voltasse a ser observado.

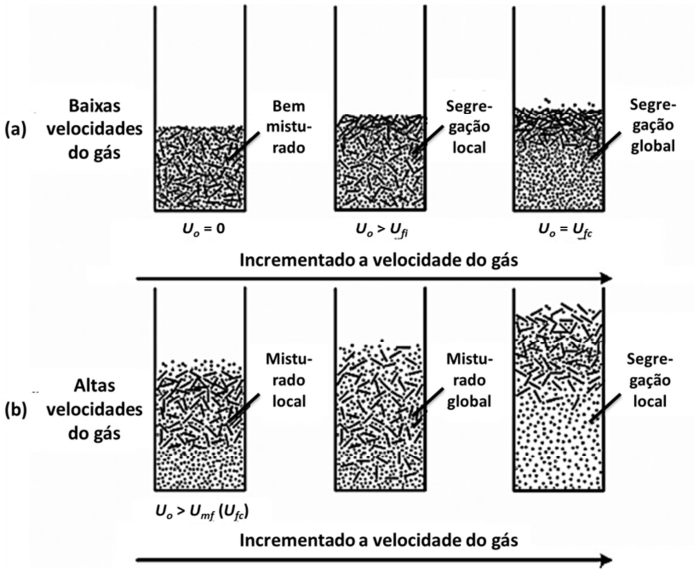


Figura 2.5. O processo de mistura e segregação de mistura biomassa-areia em função da velocidade do gás (adaptado de ZHANG; JIN; ZHONG, 2009).

Chok, Gorin e Chua (2010) estudaram o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias compostas por areia (4 tamanhos diferentes: 0,196< dp <2,7 mm, $\rho_p = 2700$ kg/m^3) e casca de palma (4 tamanhos diferentes: 1,77< dp < 11,75 mm, $\rho_p = 1,5$ kg/m^3) em porcentagens em peso variando de 8 a 10% visando aplicações em gaseificadores operando com leito fluidizado. Nesse trabalho, as velocidades U_{mf} e U_{fc} foram obtidas a partir da curva fluidodinâmica levantada no processo de defluidização do leito, para três valores da razão entre altura e diâmetro do leito (1 < H/D < 2). Seus resultados mostraram que a tendência para a segregação é maior em leitos onde a razão $dp_{biomassa}/dp_{areia}$ é maior, devido à menor contribuição de colisão partícula-partícula. Consequentemente, são necessárias maiores velocidades superficiais para fluidizar a mistura do leito, especialmente se houver alguma formação de aglomerados de biomassa, favorecida pelo aumento da concentração da mesma. De acordo com

esses pesquisadores, seus estudos comprovaram que as velocidades características das misturas binárias casca de palma-areia não somente dependem das propriedades do leito, mas também são influenciadas pela condição de mistura/segregação do leito. Adicionalmente, eles encontraram que a geometria do leito é um fator igualmente importante para a qualidade da fluidização.

Segundo Pécora *et al.* (2013), a revisão da literatura sobre a fluidodinâmica de leitos contendo misturas mostra que diversos trabalhos têm sido realizados desde a década de 1970 envolvendo a determinação experimental da U_{mf} para misturas polidispersas e/ou possuindo diferentes materiais. Segundo os autores, as correlações para U_{mf} de misturas são calculadas, de forma geral, considerando a mistura como composta por apenas um componente, cuja densidade e diâmetro médio das partículas são estimados a partir das características de seus componentes individuais e de seus percentuais em massa (x), ou em volume (α), na mistura. A fração em massa do componente com tendência a flutuar na mistura ($x_{flotsam}$) foi definida através da Eq. (2.12).

$$x_{flotsam} = \frac{massa\ flotsam}{massa\ da\ mistura} = 1 - x_{jetsam} \tag{2.12}$$

Na expressão acima, x_{jetsam} é a fração em massa do material com tendência a afundar (*jetsam*). As frações em volume dos componentes *flotsam* e *jetsam* foram calculadas a partir das Eqs. (2.13) e (2.14), conhecidas as massas ($m_{flotsam}$ e m_{jetsam}), densidades ($\rho_{flotsam}$ e ρ_{jetsam}), altura do leito empacotado livremente (H_m) e área transversal da coluna (A).

$$\propto_{flotsam} = \frac{V_{flotsam}}{V_L} = \frac{m_{flotsam}/\rho_{flotsam}}{H_m A} \tag{2.13}$$

$$\propto_{jetsam} = \frac{V_{jetsam}}{V_L} = \frac{m_{jetsam}/\rho_{jetsam}}{H_m A} \tag{2.14}$$

Pécora *et al.* (2013) comentaram que estudos como os de Wu e Baeyens (1998), Chyang, Kuo e Chen (1989) e Li *et al.* (2005) apresentaram levantamentos de correlações empíricas, para a determinação de U_{mf} para misturas. A Tab. 2.1 destaca algumas das correlações apresentadas nesses trabalhos, as quais foram obtidas a partir de experimentos envolvendo biomassas. Além

disso, essa tabela procurou reunir correlações publicadas, até os dias atuais. Os autores verificaram que muitas correlações propostas para estimar a U_{mf} de misturas baseiam-se nas propriedades dos componentes individuais, como a proposta por Otero e Corella (1971) [Eq. (2.15)], ou em grupos adimensionais contendo o diâmetro e densidades efetivos (d_e e ρ_e) da mistura como parâmetros. No entanto, comentaram que várias seguem o formato originalmente proposto por Wen e Yu (1966) como a de Thonglimp, Hiquily e Laguerie (1984), mostrada na Eq. (2.16).

$$U_{mf} = x_{flotsam}.U_{mf,flotsam} + x_{jetsam}.U_{mf,jetsam} \tag{2.15}$$

$$Re_{mf} = (19{,}9^2 + 0{,}03196.Ar)^{0{,}5} - 19{,}9 \tag{2.16}$$

O número de Reynolds *(Re_{mf})* e o número de Arquimedes *(A_r)* foram calculados a partir das Eqs. (2.17) e (2.18).

$$Re_{mf} = \frac{\rho_e\, U_{mf}\, dp_e}{\mu} \tag{2.17}$$

$$Ar = \frac{dp_e^3 \rho_g (\rho_e - \rho_g) g}{\mu^2} \tag{2.18}$$

O diâmetro e a densidade efetiva (dp_e e ρ_e) foram estimados aplicando-se as Eqs. (2.19) e (2.20) para aplicação das equações da Tab. 2.1, segundo Pécora *et al.* (2013).

$$dp_e = dp_{flotsam}.dp_{jetsam}\left[\frac{x_{flotsam}\rho_{jetsam} + x_{jetsam}\rho_{flotsam}}{x_{flotsam}\rho_{jetsam}dp_{jetsam} + x_{jetsam}\rho_{flotsam}dp_{flotsam}}\right] \tag{2.19}$$

Tabela 2.1. Correlações da literatura para estimar a U_{mf} de misturas binárias contendo biomassas (PÉCORA *et al.*, 2013).

Autor (es)	Biomassa	Inerte	Teor de biomassa na mistura	H/D	Correlação
Noda *et al.* (1986)	Madeira: dp = 6540 a 12500 μm; $\rho_{ap} = 440\ kg/m^3$ Soja: dp = 785 μm; $\rho_{ap} = 1220\ kg/m^3$ Outros grãos: dp = 454 a 2830 μm; $\rho_{ap} = 1260\ a$ $7530\ kg/m^3$	Areia: dp = 454 μm; $\rho_{ap} = 2600\ kg/m^3$	0 a 100%	0,2 a 1,2	$ARe_{mf}{}^2 + BRe_{mf} = Ar$ $A = 36{,}2\left(\frac{dp_{jetsam}}{dp_{flotsam}}\frac{\rho_{flotsam}}{\rho_{jetsam}}\right)^{-0{,}196}$ $B = 1397\left(\frac{dp_{jetsam}}{dp_{flotsam}}\frac{\rho_{flotsam}}{\rho_{jetsam}}\right)^{0{,}296}$ (leito completamente misturado)
Bilbao, Lezaun e Abanades (1987)	Palha de trigo: dp = 346 a 1788 μm $\rho_{ap} = 350\ kg/m^3$	Areia: dp = 158; 245 e 346 μm; $\rho_{ap} = 2100\ kg/m^3$	0 a 15%	n.d.	$U_{mf} = U_{mf,flotsam} - (U_{mf,flotsam} - U_{mf,jetsam})X_{jetsam}$ $X_{jetsam} = \frac{x_{jetsam}}{x_{jetsam} + \frac{\rho_{jetsam}(1-x_{jetsam})}{\rho_{flotsam}}}$; $U_{mf,flotsam} = 50.dp_{flotsam}^{0{,}84}$
Rao e Bheema-rasetti (2001)	Casca de arroz: (2x1x10) mm^3 Serragem de madeira: dp = 800 a 1000 μm Casca de amendoim: dp = 800 a 1200 μm	Areia: dp = 355 a 600 μm, e dp = 250 a 355 μm; $\rho_{ap} = 2500$ $e\ 2700\ kg/m^3$	0 a 15%	n.d.	$U_{mf} = \frac{dp_e^2(\rho_e - \rho_g)g}{1650\mu}$ $dp_e^2 = k'\left\{dp_{jetsam}\left(\frac{\rho_{jetsam}dp_{flotsam}}{\rho_{flotsam}dp_{jetsam}}\right)^{\frac{x_{flotsam}}{x_{jetsam}}}\right\}^2$ $\rho_e = x_{jetsam}\rho_{jetsam} + x_{flotsam}\rho_{flotsam}$ $k' = 20dp_{jetsam} + 0{,}36$ (dp_{jetsam} em metros)

n.d. = Não disponível

Tabela 2.1 (cont.). Correlações da literatura para estimar a U_{mf} de misturas binárias contendo biomassas (PÉCORA *et al.*, 2013).

Autor (es)	Biomassa	Inerte	Teor de biomassa na mistura	H/D	Correlação
Si e Guo (2008)	Serragem de madeira: dp = 700 a 1200 μm; ρ_{ap} = 1515 kg/m^3 Haste de trigo: dp = 800 a 1300 μm; ρ_{ap} = 1200 kg/m^3	Areia: dp = 255 μm; ρ_{ap} = 2650 kg/m^3	20 a 50%	n.d.	$U_{mf} = \frac{\mu}{dp_e \rho}\left\{\left[{C_1}^2 + C_2 \frac{{dp_e}^3 \rho_g (\rho_e - \rho_g) g}{\mu}\right]^{1/2} - C_1\right\}$ $C_1 = 25{,}65\left(\phi_{flotsam}^{0{,}21}\phi_{jetsam}^{0{,}15}\right)$ $C_2 = 0{,}056\left(\phi_{flotsam}^{-0{,}045}\phi_{jetsam}^{0{,}025}\right)$
Di Maio, Di Renzo e Vivacqua (2012)	Várias (dados coletados na literatura) dp = 64 a 2000 μm; $\rho_{ap} = 200\ a$ 248 kg/m^3	Vários (dados coletados na literatura) dp = 275 a 2950 μm; $\rho_{ap} = 492\ a$ 8860 kg/m^3	4 a 80%	n.d.	$U_{mf} = \frac{g\varepsilon_{mf}^3}{180(1-\varepsilon_{mf})\mu}\bar{\rho}(\overline{dp_{flotsam}})^2$ $\varepsilon_{mf} = 1 - \alpha_{jetsam} - \alpha_{flotsam}$ $\bar{\rho} = \rho_{jetsam}\alpha_{jetsam} + \rho_{flotsam}(1-\alpha_j)$ $\overline{dp} = \left[\frac{\alpha_{jetsam}}{d_{jetsam}/dp_{flotsam}} + 1 - \alpha_{jetsam}\right]^{-1}$
Paudel e Feng (2013)	Espiga de milho: dp = 1080 μm; ρ_{ap} = 1040 kg/m^3 Casca de noz: dp = 100 a 856 μm ρ_{ap} = 1200 kg/m^3	Areia: dp =241 µm; ρ_{ap} = 2630 kg/m^3 Alumina: dp =490 μm; ρ_{ap} = 1870 kg/m^3	0 a 100 %	n.d.	$Re_{mf} = \left\{30{,}28^2 + \left[0{,}046(1 - x_{flotsam}) + 0{,}108 x_{flotsam}^{\frac{1}{2}}\right] Ar\right\}^{\frac{1}{2}} - 30{,}28$ + Equações (2.17) a (2.20) $Re_{mf,flotsam} = (30{,}28^2 + 0{,}108Ar)^{1/2} - 30{,}28$

n.d. = Não disponível

$$\frac{1}{\rho_e} = \frac{x_{flotsam}}{\rho_{flotsam}} + \frac{x_{jetsam}}{\rho_{jetsam}} \tag{2.20}$$

No entanto, Pécora *et al.* (2013) esclareceram que Rasul e Rudolph (2000) propuseram as Eqs. (2.19a) e (2.20a) para o cálculo do diâmetro efetivo e densidade efetiva do material presente na mistura as quais estão baseadas na fração volumétrica dos componentes na mistura.

$$dp_e = \frac{dp_{flotsam}.dp_{jetsam}(\alpha_{flotsam} + \alpha_{jetsam})}{\alpha_{flotsam} d_{jetsam} + \alpha_{jetsam} d_{flotsam}} \tag{2.19a}$$

$$\rho_e = \varepsilon\rho_g + \alpha_{flotsam}\rho_{flotsam} + \alpha_{jetsam}\rho_{jetsam} \tag{2.20a}$$

Pécora *et al.* (2013) salientaram que, tratando-se de misturas compostas por biomassas e areia, o material *flotsam* é normalmente a biomassa enquanto que a areia é normalmente o material que apresenta tendência a afundar (*jetsam*). Nesse trabalho, a correlação mais recente foi a apresentada por Paudel e Feng (2013) a qual foi obtida em experimentos onde o teor de biomassa na mistura variou entre 0 e 100%. No entanto, os autores comentaram que é necessário cuidado na aplicação desta correlação, pois algumas biomassas só conseguem fluidizar com o auxílio de um material inerte. Comentaram ainda que o aumento da fração de biomassa na mistura tende a dificultar a sua fluidização, fazendo com que exista, em alguns casos, percentual limite para a fluidização da mistura. Salientaram que a contribuição do trabalho de Di Maio, Di Renzo e Vivacqua (2012) é importante, na medida em que, além de terem proposto uma correlação para estimar a U_{mf} de misturas binárias compostas por materiais com tamanho uniforme, forneceram um critério para prever qual dos materiais será o *flotsam* no leito segregado.

A Tabela 2.2 mostra o resumo dos parâmetros analisados e as principais conclusões obtidas nos trabalhos que foram apresentados neste capítulo, visando contribuir para o entendimento e discussão da fluidodinâmica de leitos fluidizados contendo misturas de partículas.

Tabela 2.2. Resumo dos critérios de análise e principais conclusões obtidas no estudo da fluidodinâmica de leitos fluidizados contendo misturas de partículas.

Autor (es)	Materiais	Critérios para a análise dos resultados	Conclusões ressaltadas
Rowe e Nienow (1976)	Misturas binárias com partículas diferentes tamanhos e densidades	H vs x_{jetsam} U_{mf} vs x_{jetsam} im vs U_{mf}	A diferença de densidade das partículas é um fator mais importante do que a diferença do tamanho na determinação do grau de segregação. Velocidades superiores à U_{mf} produzem maiores flutuações do componente *flotsam*. Em taxas moderadas de U_o, no regime borbulhante, o componente *flotsam* é constantemente carregado à superfície pelo fluxo do *jetsam.*
Bilbao, Lezaun e Abanades (1987)	Palha e areia	α_{areia} vs $dp_{biomassa}$ α_{areia} *vs* dp_{areia} U_{mf} vs α_{areia} U_{mf} *vs* dp_{areia}	As partículas maiores de biomassa exigem maior teor de areia na mistura para alcançarem o regime de leito fluidizado, esse teor pode ser reduzido com a redução do tamanho das partículas de areia presentes no leito. U_{mf} decresce com a redução do tamanho e com o aumento do teor de areia na mistura
Formisani (1991)	Esferas de vidro	ε_{mf} vs $x_{flotsam}$ U_{mf} vs $x_{flotsam}$	A razão $dp_{jetsam}/dp_{flotsam}$ e a composição do leito afetaram o valor de ε_{mf} e de U_{mf} da mistura binária. Verificaram que a equação de Carman-Kozeny [Eq. (2.1)] forneceu boa aproximação com os resultados experimentais desde que o valor de ε_{mf} da mistura seja obtido experimentalmente.
Tannous, Hemati e Laguerie (1998)	Areia	U_{fc}, U_s, U_{fi} vs dp U_{fc}, U_s, U_{fi} vs im	As velocidades U_{fi}, U_s e U_{fc} não foram influenciadas pelo diâmetro da coluna nem pela altura do leito estático. O aumento do índice de mistura levou ao aumento da $U_{fi,}$ e à redução de U_{fc} e U_s. O intervalo da segregação (U_{fc} - U_{fi}) tende a ser menor com o aumento do índice de mistura.

Tabela 2.2 (cont.). Resumo dos critérios de análise e principais conclusões obtidas no estudo da fluidodinâmica de leitos fluidizados contendo misturas de partículas.

Rao e Bheemarasetti (2001)	Biomassa (casca de arroz, serragem e casca de amendoim em pó) e areia	U_{mf} vs $x_{biomassa}$	As correlações propostas na literatura para determinar a U_{mf} de misturas binárias de areia e biomassa não apresentaram resultados próximos aos experimentais e propuseram uma correlação baseados em seus dados.
Formisani, Girimonte e Longo (2008)	Esferas de vidros e tiras de aço	U_{mf} vs $x_{flotsam}$ ε_{mf} vs $x_{flotsam}$ U_{fc} e U_{fi} vs $x_{flotsam}$ U_{fc} e U_{fi} vs H/D	As velocidades U_{fi} e U_{fc} de qualquer mistura binária, e seu equilíbrio mistura-segregação dependem da densidade, diâmetro e forma das partículas, além da composição da mistura. A U_{fi} de uma mistura binária depende da distribuição inicial dos seus componentes no leito, enquanto que a sua U_{fc} é praticamente insensível a esse parâmetro.
Zhang, Jin e Zhong (2009)	Haste de algodão e areia	ρ_L, ε_L vs $x_{biomassa}$ *concentraçao dos sólidos* vs $\frac{U_{mf}-U_{fi}}{U_{fc}-U_{fi}}$	Dentro do regime de fluidização parcial, a maioria da biomassa acumula-se no topo do leito, promovido pelo aumento da U_o. Ao longo de uma ampla faixa de U_o, o leito pode apresentar segregação local, segregação global, mistura local, mistura global e re-segregação. Além disso, a concentração da mistura biomassa-areia tem efeito quantitativo sobre a ΔP_L, distribuição final da biomassa no leito e índice de mistura.
Chok, Gorin e. Chua (2010)	Casca de palma e areia	U_{fc}-U_{mf} vs dp_{areia} U_{fc}/U_{mf} vs dp_{areia}	As velocidades características das misturas binárias casca de palma-areia não somente dependem das propriedades efetivas do leito, mas também é influenciada pela condição de mistura/segregação. Além disso, a geometria do leito é um fator igualmente importante para a qualidade da fluidização.

2.2. A biomassa bambu

Bambu é o termo comum para os membros de um determinado grupo taxonômico de gramíneas lenhosas grandes (subfamília *Bambusoideae*, família *Poaceae/Andropogoneae*). Os bambus englobam 1250 espécies dentro de 75 gêneros, a maioria dos quais são de relativamente rápido crescimento, alcançando a sua altura da maturidade no redor de cinco anos (SCURLOCK, 2000).

A raiz do bambu é chamada de rizoma e distingue-se pela forma da ramificação. O rizoma é de grande importância, não apenas como um corpo no qual estão armazenados os nutrientes que logo são distribuídos entre as diversas partes da planta, mas como um elemento básico para a propagação do bambu, que assexuadamente realiza-se pela ramificação dos rizomas (RAMÓN, 2006). O autor comenta que a partir de cada um dos nós do rizoma, pode-se produzir um novo colmo ou um novo rizoma; os colmos podem apresentar maior diâmetro que o rizoma. Um fato importante é que os brotos de bambu são permanentes e contínuos. Isso permite que eles possam ser explorados em todo seu ciclo biológico, ao mesmo tempo em que é aproveitado a sua função de proteção do solo. O bambu está constituído por uma parte aérea, colmo que também é chamado de cana ou vara, e outra subterrânea, caracterizada pela presença de rizoma ou raiz. Seus colmos são ligeiramente cilíndricos, ocos (embora também ocorram bambus maciços, mas raramente, por exemplo, o gênero *Chusquea*) e separados transversalmente por internos, denominados de diafragmas, que externamente é representado pelos nós de onde nascem os ramos e folhas. Os diafragmas fornecem maior rigidez e resistência aos colmos (GUARNETTI, 2007; PEREIRA E BERALDO, 2007). A Fig. 2.6 mostra as partes constituintes de um bambu.

O bambu, ao contrário de outras plantas, não tem crescimento do diâmetro com o tempo, mas diminui proporcionalmente com a sua altura; uma vez que o bambu brota do chão ele já tem o diâmetro máximo que vai ter na sua vida, não aumenta de espessura, mas diminui com a altura. O colmo de qualquer espécie de bambu completa seu crescimento poucos meses após o surgimento do broto, alcançando sua altura máxima em um mínimo de 30 dias para as espécies de pequeno porte, e num máximo de 180 dias para as espécies gigantes, alongando-se continuamente

de 20 a 1 cm diariamente (PEREIRA; BERALDO, 2007). Nos primeiros 4 a 12 meses, eles são muito macios e flexíveis, de modo que nesse momento o bambu pode ser usado na fabricação de artesanato. Os colmos atingem boa resistência mecânica entre 3 e 6 anos, idade apropriada para uso em construção. Após 6 anos, começa a perder a vitalidade (RAMÓN, 2006; PEREIRA E BERALDO, 2007).

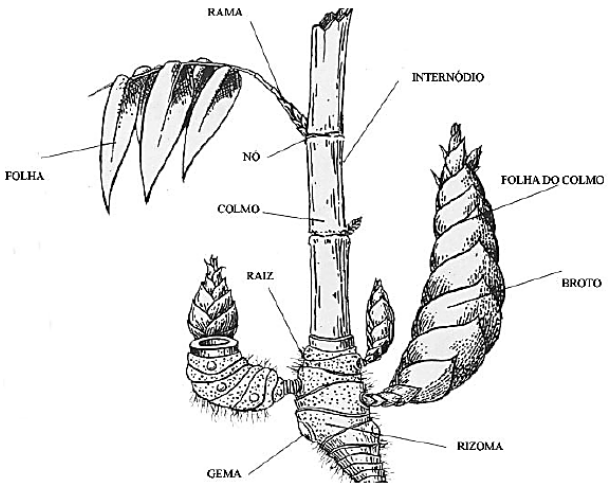


Figura 2.6. Partes do bambu (TEIXEIRA, 2006).

O bambu é um material diferente das madeiras em termos de sua anatomia, morfologia, crescimento e propriedades de resistência, tendo variações significativas em suas propriedades, tanto na direção vertical correspondente a sua altura (da base do colmo em direção a sua ponta), como na direção horizontal relativa à sua espessura (através da parede do colmo). Variações que ocorrem também em função da espécie, das condições locais de cultivo e principalmente em função da idade dos colmos (PEREIRA; BERALDO, 2007; RBB, 2011). Os bambus têm duas características biológicas que os tornam plantas extraordinários: floração e crescimento rápido. É bem divulgado que algumas espécies de bambu podem crescer até 1,25 m por dia (RAMÓN, 2006; PEREIRA; BERALDO, 2007). Os pesquisadores ressaltam que a colheita do bambu, ao contrário da madeira, não mata a planta, mas ao contrário, revigora-a, dentro de um manejo adequado de exploração.

De acordo a Judziewicz *et al.* (1999), citado por Londoño (1998), a América Latina é a

região mais rica das Américas em termos de diversidade e no número de espécies de bambu lenhosos, sendo que 20 gêneros e 429 espécies de bambus lenhosos são distribuídos desde aproximadamente 27° Norte (*Otate acuminata* encontrada na região noroeste do México) a 47° Sul (*Chusquea culeou* no Chile). Acredita-se que as diferentes espécies de bambu na América Latina cobrem cerca de 11 milhões de hectares (não contabilização de áreas naturais na região amazônica), e que 11% da área ocupada por florestas andinas contêm espécies de bambu (KAHLER, 2005). Segundo Londoño (1998), o Brasil é o país com a maior diversidade e o maior percentual de bambus lenhosos endêmicos na América Latina (Fig. 2.7) com 135 espécies (32% das espécies de bambus latino-americanos) e 17 gêneros (85% dos gêneros de bambus latino-americanos) (LONDOÑO, 1998; PELLEGRINI, 2008).

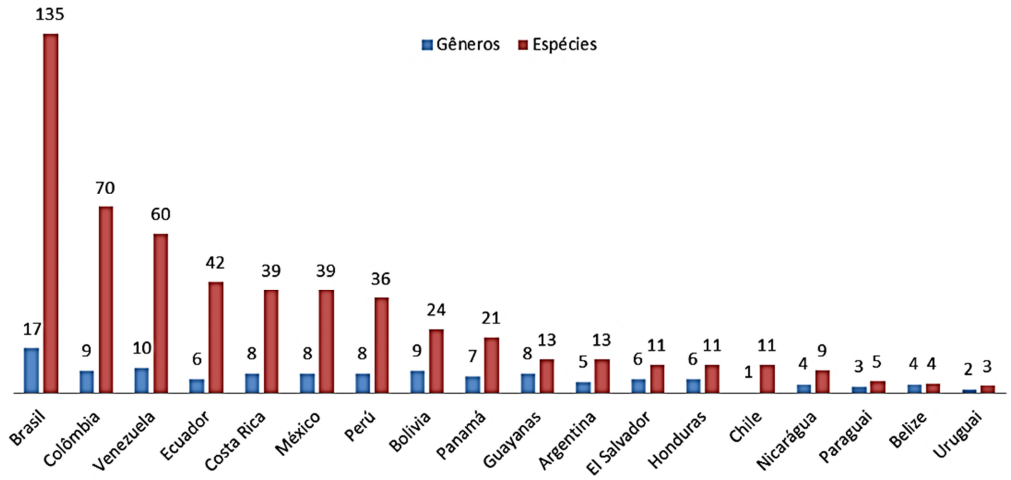


Figura 2.7. Número de gêneros e espécies nos países da América Latina (LONDOÑO, 1998).

Os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Santa Catarina, Bahia e Paraná têm a maior diversidade de bambus lenhosos (LONDOÑO, 1998). Mas também nos estados do Acre e Amazonas há grandes plantações de bambu com diferentes variedades e que apresentam, aproximadamente, 70.000 km² e 20.000 km², respectivamente (FIALHO, TONHOLO; DA SILVA, 2005). De acordo com Fialho, Tonholo e Da Silva (2005), o Instituto do Bambu fez uma avaliação preliminar onde identificou os focos geográficos de interesse para o desenvolvimento

de projetos do bambu no Brasil, os quais estão esquematizados na Fig. 2.8.

Figura 2.8. Croqui da distribuição geográfica do bambu no Brasil (FIALHO, TONHOLO E DA SILVA, 2005).

Na região Centro-Oeste destaca-se o Mato Grosso do Sul pela ocorrência massiva de bambus do gênero *Guadua*, com ocorrência das espécies *angustifolia*, *amplexifolia*, superba e *weberbauri*, bambu nativo de grande aptidão para a construção civil e o processamento industrial. Encontram-se ainda de forma mais esparsa, ocorrências de outros bambus lenhosos como o bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*), o bambu comum ou bambu verde (*Bambusa vulgaris*) e a sua variedade, amarela com listras verdes, conhecida como "bambu brasileiro" (*Bambusa vulgaris,* variedades *wamin* e *vittata*), o bambu verde fino (*Bambusa tuldoides*) e ainda em várias regiões, o bambu de vara de pescar, ou chamado de cana da Índia (*Phyllostachys aurea*) (FRANÇA *et al.,* 2001).

2.2.1. O bambu como recurso energético

Dentre as inúmeras fontes de biomassa, o bambu pode ser considerado como uma fonte de energia viável devido a diversas considerações, entre elas pela sua composição química, pois a holocelulose (celulose e hemicelulose) contida nas suas fibras pode ser utilizada para a produção de metano a partir de processos biológicos, como digestão anaeróbia (ASADA; NAKAMURA; KOBAYASHI, 2005; FRANÇA *et al.,* 2001). O aproveitamento da biomassa para fins energéticos pode ser feito por meio de sua aplicação na combustão direta, pirólise e gaseificação ou em processos que envolvem a hidrólise da holocelulose.

O potencial energético de biomassa no Brasil é proveniente dos setores de açúcar e álcool e de papel e celulose; dos resíduos agrícolas e de indústrias madeireiras; florestas energéticas e plantas oleaginosas. No ano de 2006, a oferta interna de energia no Brasil foi de 226 milhões de toe (toneladas equivalentes de petróleo) ou 1,12 toe por habitante (Fig. 2.9). Segundo Lora e Andrade (2009) para esse ano, as fontes renováveis de energia foram responsáveis por 45,1% dessa oferta, sendo que 14,8% vieram de fontes hidrelétricas e 27,2% a partir de biomassa.

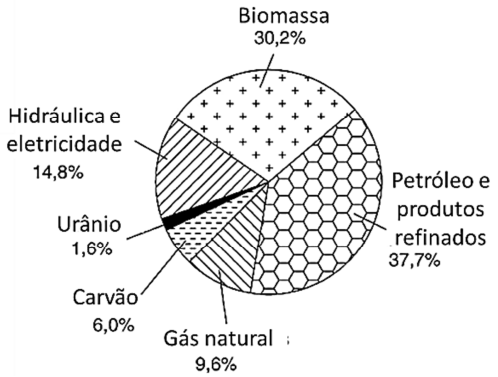


Figura 2.9. Oferta de energia interna no Brasil em 2006 (LORA; ANDRADE, 2009).

Segundo Lora e Andrade (2009), no Brasil, a implantação da bioenergia está ocorrendo em três níveis: um primeiro nível de baixas potências, variando de 1 a 3 para algumas dezenas de kWs (típico de pequenas comunidades); um segundo nível caracterizado por potências que

podem atingir até alguns MWs, que é típico de comunidades com centenas de habitantes, serra-usinas, fábricas de móveis e estações de tratamento de arroz; e há um terceiro nível, apresentando capacidade de 5 a 10 MW, típica de plantas de açúcar e álcool, fábricas de celulose e papel, além de usinas térmicas.

De acordo com a Rede Brasileira do Bambu - RBB (2011), na região Norte já existe uma demanda energética no que tange à substituição da matéria-prima convencional (madeira) por biomassa do bambu que está sendo trabalhada pelo grupo Cornélio Brennand e Koblitz em Itacoatiara, AM. No nordeste do Brasil os resíduos agrícolas e os resultantes dos processos industriais são as principais fontes regionais de biomassa, além da indústria de açúcar, principal economia local. A região é rica em indústrias de papel e celulose que utilizam inúmeros tipos de fibras, tais como as de bambu (FRANÇA *et al.,* 2001). Na região Sudeste, principalmente no eixo Rio-São Paulo-Minas, o grande atrativo é a diversidade de espécies, a existência de centros de pesquisa de excelência e uma concentração de mercado diferenciada, com iniciativas de relativo sucesso, que apontam resultados promissores como o programa em implantação no município de Três Rios, RJ. A região da Zona da Mata Nordestina tem como maior premissa a inclusão social e geração de trabalho e renda aos egressos da cultura da cana de açúcar. É só nesta região do país que se observam plantações de bambu em grande escala, com tecnologia desenvolvida.

O bambu é uma potencial fonte de biomassa sustentável para a produção de energia renovável, pois se trata de um recurso que pode totalizar mais de 36 milhões de hectares em todo o mundo. Os potenciais técnico-econômico e de sustentabilidade como matéria-prima para a economia diferem de acordo com as espécies, locais de produção e cultivo, etc. (DAZA *et al.*, 2013). Tem sido reconhecido como a planta de mais rápido crescimento no mundo, com características muito favoráveis para a gaseificação e a síntese de gasolina e diesel (RBB, 2011).

Combustíveis de biomassa e seus resíduos podem ser convertidos em fontes de energia mais valiosas através de diversos processos que incluem processos térmicos, biológicos e físicos ou mecânicos (BRIDGWATER; MEIER; RADLEIN, 1999). A pirólise é, provavelmente, o processo de conversão mais atraente. Nela a biomassa é aquecida a temperaturas moderadas numa atmosfera inerte para produzir sólidos, líquidos e produtos gasosos. A pirólise data do tempo do antigo Egito, onde o alcatrão era gerado por pirólise para calafetagem de barcos e para

ser usado como agente de embalsamento. Com o desenvolvimento industrial, a pirólise foi aplicada para a produção de carvão e coque. Apenas nos últimos 30 anos é que a pirólise rápida a temperaturas moderadas (ao redor de 500 ºC) e tempo de reação curto, tornou-se de grande interesse (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006; AÇIKALIN; KARACA; BOLAT, 2012). Geralmente, a pirólise lenta está relacionada com os processos de pirólise tradicionais utilizados para a fabricação de carvão, enquanto pirólise rápida é um processo mais avançado, que pode dar elevados rendimentos de produto líquido (PÜTÜN *et al*., 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capitulo são apresentados o sistema experimental, instrumentação e as características dos materiais utilizados neste estudo, bem como a metodologia usada para obter as propriedades das partículas, as curvas fluidodinâmicas e a obtenção dos parâmetros para análise dos resultados.

3.1. O bambu

O bambu usado nesta pesquisa é da espécie gigante, *Dendrocalamus giganteus* Munro, popularmente conhecido como bambu gigante, sendo uma espécie *entouceirante* de grande porte, cujos colmos podem variar de 24 a 40 m de altura, com diâmetros entre 10 e 20 cm e espessura de parede entre 1 a 3 cm (PEREIRA; BERALDO, 2007; POTENCIANO *et al.,* 2012). Foi coletado da Faculdade de Engenharia Agrícola, no campus da Universidade Estadual de Campinas. A idade aproximada do bambu utilizado é de 5 anos. Esta idade foi escolhida porque de três a sete anos é considerado o período de vida útil do bambu, antes de se iniciar o processo de secagem na touceira. Colmos mais novos ou imaturos possuem maior teor de umidade do que os maduros, não sendo adequados para utilização em processos de geração de energia (PEREIRA; BERALDO, 2007).

A preparação da biomassa foi realizada de acordo com o "Método A" da norma ASTM E1757-01 (2007), para amostras com quantidades acima de 20g. Os colmos do bambu foram cortados com motosserra e, em seguida, foram cortados em discos e, posteriormente, em pequenos cubos, passando por uma etapa de pré-secagem à temperatura ambiente por um tempo de duas semanas. Posteriormente foram moídos em moinho de martelo até a obtenção de partículas com tamanho inferior a 2 mm. Para diminuir a elevada umidade típica de biomassas, o material foi colocado em estufa a 60 °C, sendo peneirado em seguida. A Fig. 3.1 apresenta fotografias do bambu em suas diversas etapas de preparação para os testes de caracterização e de pirólise.

Figura 3.1. (a) Cultivo de bambu na Faculdade de Agrícola da Unicamp, (b) colmos de bambu após do corte, (c) bambu cortado em discos, (d) bambu cortado em cubos e (e) bambu moído.

3.2. Carvão de bambu resultante do processo de pirólise

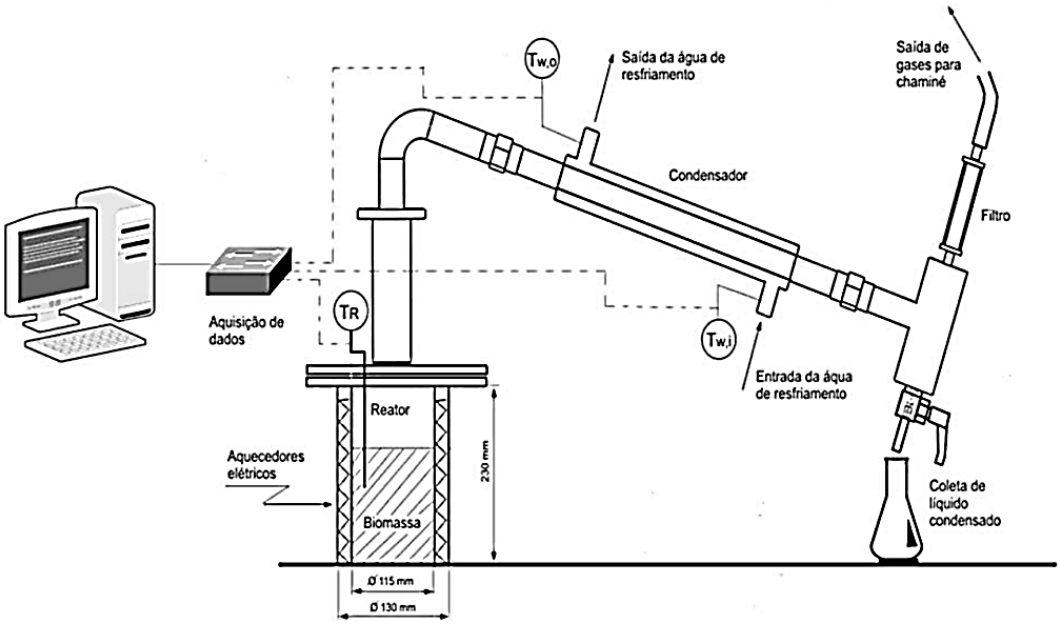


Figura 3.2. Esquema do reator de pirólise.

O produto sólido obtido dos processos da pirólise é composto principalmente de carbono fixo, material volátil e cinzas. Pode ser usado como combustível diretamente, como enriquecedor do solo e como fertilizante (PÜTÜN *et al*, 2007; AÇIKALIN; KARACA; BOLAT, 2012). O carvão usado nesta pesquisa foi obtido no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (ProTea) do Departamento de Energia (DE) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) na UNICAMP. A Fig. 3.2 mostra uma fotografia do reator utilizado para a produção do carvão, a partir de um procedimento de pirólise lenta com taxa de aquecimento de 10 ^{o}C/min durante 1 hora a 500 °C.

A Figura 3.3 mostra o carvão de bambu utilizado nos testes fluidodinâmicos, produto do processo de pirólise.

Figura 3.3. Carvão produto do processo pirolítico.

3.3. Caracterização da biomassa

A caracterização de cada material foi realizada no Laboratório de Sistemas Fluidotérmicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, visando à determinação do diâmetro médio de Sauter, a massa específica (ou densidade) de cada material, a densidade do leito empacotado naturalmente (densidade *bulk*) e a esfericidade. Foram realizadas três repetições de cada análise, calculando-se o valor médio e o desvio médio das medidas (TAYLOR, 1982).

O valor médio de cada parâmetro estudado ($\bar{x}$) e o desvio médio das medidas ($\Delta\bar{x}$) foram

obtidos através das Eqs. (3.1) e (3.2) (TAYLOR, 1982). Para uma grandeza qualquer *Xi*.

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^k X_i}{N_i} \tag{3.1}$$

Onde *Ni* é o número de repetições.

$$\Delta\bar{x} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{Ni}} \tag{3.2}$$

Onde σ_x é o desvio padrão das medidas.

3.3.1. Tamanho das partículas

A determinação experimental do tamanho da partícula do material foi feita através da técnica de peneiramento, levantando-se a curva da distribuição granulométrica das partículas e estimando o diâmetro médio de Sauter ($\overline{dp}$). Foram selecionadas as peneiras da marca Granutest com razão de $\sqrt{2}$ entre a abertura de duas peneiras consecutivas. Estas peneiras foram colocadas no vibrador de marca Produtest e submetidas à vibração durante aproximadamente 15 minutos. Uma balança analítica digital com precisão de 0,0001 g, marca OHAUSS, modelo GE200, foi utilizada para pesagem das amostras.

Obtendo-se a fração mássica de material retido em cada peneira, para cada teste realizado. O diâmetro médio de Sauter ($\overline{dp}$) foi calculado para cada um dos testes conforme a Eq. (3.3).

$$\overline{dp} = \left(\sum_{i=1}^{k} \frac{x_i}{\overline{dp_i}}\right)^{-1} \tag{3.3}$$

Onde x_i é a fração mássica das partículas retidas entre duas peneiras consecutivas de abertura d_i e d_{i+1}. dp_i é o diâmetro conforme Eq. (3.4):

$$\overline{dp_i} = \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2}\right) \tag{3.4}$$

Onde i varia de 1 a k, sendo k o número de peneiras utilizadas. Foram realizadas três análises granulométricas para cada material.

3.3.2. Massa específica aparente

A densidade ou massa específica aparente das partículas (ρ_p) foi obtida pelo método da picnometria, que está baseado na determinação do volume de líquido deslocado pela adição de uma massa (m_s) conhecida de partículas sólidas no recipiente. O volume de líquido deslocado pelo sólido representa o volume das partículas adicionadas (V_s), incluindo seus poros. A massa especifica aparente foi calculada por meio da Eq. (3.5).

$$\rho_p = \frac{m_s}{V_s} \tag{3.5}$$

3.3.3. Densidade e porosidade do leito empacotado naturalmente

A densidade *bulk* ou massa específica do leito empacotado naturalmente (ρ_m) de cada material foi obtida a partir da determinação do volume do leito empacotado naturalmente (V_m) e da massa de partículas inseridas no leito (m_L), segundo a Eq. (3.6).

$$\rho_m = \frac{m_L}{V_m} \tag{3.6}$$

A porosidade do leito empacotado naturalmente foi obtida a partir da densidade bulk e da densidade da partícula, conforme Eq. (3.7).

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_p} \tag{3.7}$$

A porosidade do leito contendo as misturas estudadas, na condição de mínima fluidização (ε_{mf}), foi calculada da forma proposta por Formisani (1991), ou seja: mediu-se o volume do leito após fluidização vigorosa (média de 3 posições ao longo do raio), sendo este volume considerado o volume do leito na condição de mínima fluidização ($V_{L,mf}$). Logo, ε_{mf} foi calculada através da Eq. (3.8) conhecendo-se a massa e a densidade dos componentes da mistura.

$$\varepsilon_{mf} = \frac{V_{L,mf} - \left(\frac{m_f}{\rho_{p,f}} + \frac{m_j}{\rho_{p,j}}\right)}{V_{L,mf}} \tag{3.8}$$

3.3.4. Esfericidade do material particulado

A esfericidade (ϕ) foi determinada a partir da correlação de Ergun (1952) (YANG, 2003), Eq. (3.9), usando-se dados experimentais da queda de pressão no leito (ΔP_L), altura do leito no regime fixo (H_{LF}), U_o e permeabilidade do meio no leito fixo (K).

$$\frac{\Delta P_L}{H_{LF}} = \frac{\mu}{K} U_o + \frac{c\,\rho_g}{\sqrt{K}}\ {U_o}^2 \tag{3.9}$$

Onde, $\frac{\mu}{K} U_o$ é o termo viscoso e $\frac{c\,\rho_g}{\sqrt{K}}\ {U_o}^2$ é o termo inercial da Eq. (3.9). Para partículas não esféricas K está dada pela Eq. (3.10). Para Re_p < 20 o termo inercial pode ser desprezado e a Eq. (3.9) fica reduzido à Eq. (3.11).

$$K = \frac{{\varepsilon_{LF}}^3 (\emptyset\, dp)^2}{150\ (1-\varepsilon_{LF})^2} \tag{3.10}$$

$$\Delta P_L = \frac{\mu\, H_{LF}}{K} U_o \tag{3.11}$$

Onde $\frac{\mu\, H_{LF}}{K}$ da Eq. (3.11) é a própria inclinação (m) da reta obtida na curva fluidodinâmica de ΔP_L vs U_O, Eq. (3.12), como se apresenta na Fig. 3.4.

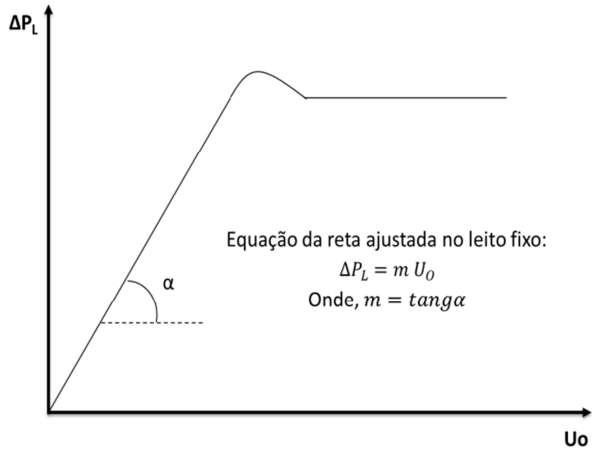


Figura 3.4. Inclinação m da reta ajustada para o leito fixo na curva fluidodinâmica ΔP_L vs U_O.

$$m = \frac{\mu\, H_{LF}}{K} = \frac{150\, \mu\, H_{LF}(1-\varepsilon_{LF})^2}{\varepsilon_{LF}{}^3(\emptyset\, dp)^2} \tag{3.12}$$

Isolando a esfericidade da partícula na Eq. (3.12) obtém-se a Eq. (3.13).

$$\emptyset = \sqrt{\frac{150\, \mu\, H_{LF}(1-\varepsilon_{LF})^2}{m\, \varepsilon_{LF}{}^3 dp^2}} \tag{3.13}$$

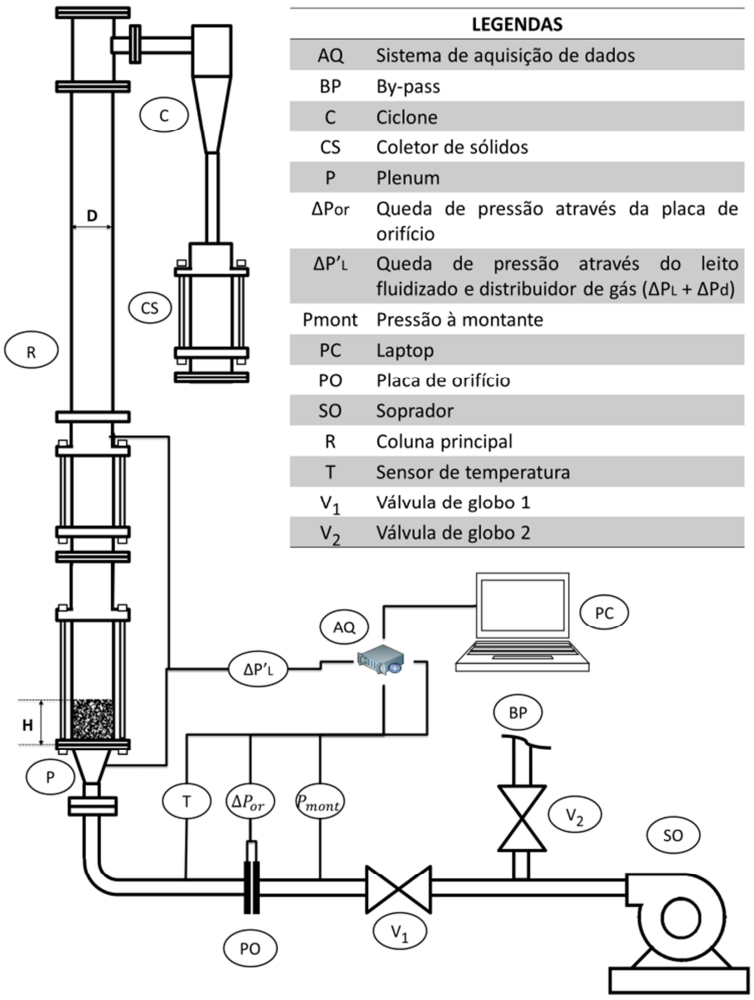
Onde a porosidade do leito fixo (ε_{LF}) foi medida no regime de leito fixo durante os testes.

No caso das biomassas onde o diâmetro médio de Sauter (dp) é difícil de ser determinado, em função da heterogeneidade das partículas e de suas dimensões geométricas, é mais aconselhável obter o valor de γ, que corresponde ao produto da esfericidade pelo diâmetro médio das partículas, ou seja:

$$\gamma = \emptyset\, dp = \sqrt{\frac{150\, \mu\, H_{LF}(1-\varepsilon_{LF})^2}{m\, \varepsilon_{LF}{}^3}} \tag{3.14}$$

3.4. Sistema experimental

O leito fluidizado utilizado para a realização dos testes fluidodinâmicos está localizado no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (ProTea) do Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos (DETF) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) na UNICAMP. A Fig. 3.5 apresenta o diagrama esquemático do sistema experimental do leito fluidizado.



LEGENDAS	
AQ	Sistema de aquisição de dados
BP	By-pass
C	Ciclone
CS	Coletor de sólidos
P	Plenum
ΔP_{or}	Queda de pressão através da placa de orifício
$\Delta P'_L$	Queda de pressão através do leito fluidizado e distribuidor de gás ($\Delta P_L + \Delta P_d$)
Pmont	Pressão à montante
PC	Laptop
PO	Placa de orifício
SO	Soprador
R	Coluna principal
T	Sensor de temperatura
V_1	Válvula de globo 1
V_2	Válvula de globo 2

Figura 3.5. Diagrama esquemático do sistema experimental.

O sistema está composto de um soprador tipo roots (*SO*) que fornece o ar, sendo a primeira regulagem feita pelo *by-pass* (*BP*) por meio da válvula de controle de vazão tipo globo (V_1). Mais adiante, na linha de suprimento de ar, outra válvula tipo globo (V_2) executa o ajuste fino da vazão. Após a válvula V_2, o ar passa pelo medidor de vazão tipo placa de orifício, construído segundo norma ASME MFC-14M/2003 (*PO*). A medida da queda de pressão através da placa de orifício (ΔP_{or}) e a pressão à montante da placa de orifício (P_{mont}) são realizadas através de transdutores de pressão diferencial marca Smar, modelo LD301. Nessa região está localizado o termopar tipo J para a medição da temperatura do ar (*T*). Durante os testes fluidodinâmicos a temperatura oscilou entre 27 e 32 °C.

Em seguida o ar ingressa no *plenum* (*P*), abaixo da placa distribuidora, para entrar na coluna principal (*R*), passando pelo leito de partículas e depois atinge, no topo, o separador ciclônico tipo Lapple (*C*) que coleta as partículas e as armazena no coletor de sólidos (*CS*). Outro transdutor (Smar, modelo LD301) é utilizado para a medida da queda de pressão através do leito fluidizado e distribuidor de gás ($\Delta P_L + \Delta P_d$), estando os pontos de medição localizados no *plenum* (*P*) e outro na coluna principal, acima do leito de partículas.

A coluna principal (*R*) foi construída intercalando seções de vidro (borosilicato), acrílico e aço carbono, conforme Fig. 3.5, o que permite a visualização do escoamento em grande parte do circuito. O diâmetro interno da coluna principal é de 0,1 m, sua altura total é de 2,5 m e a espessura da parede de 0,005 m para as seções de vidro. As diferentes seções do leito são unidas por meio de flanges metálicas de 10 mm de altura. A base do leito está equipada com um sistema de flanges que permitem a troca do distribuidor do ar e a limpeza do *plenum*.

Na Figura 3.6 estão indicadas as principais dimensões e as seções de vidro e acrílico utilizados em sua construção. Nesta pesquisa, está sendo utilizado um distribuidor do tipo placa porosa construída em resina plástica microporosa. A Fig. 3.7 apresenta a montagem da placa porosa sobre o flange da coluna principal, onde a coluna de vidro é apoiada.

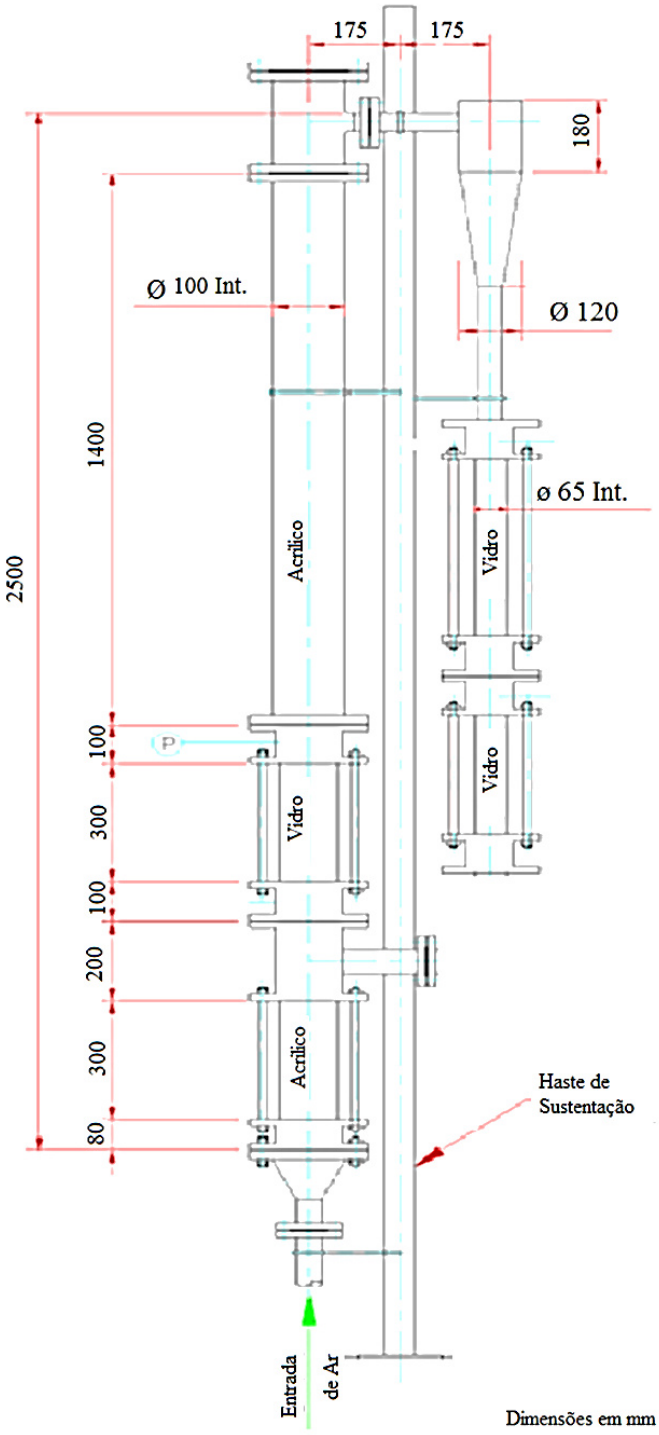


Figura 3.6. Diagrama esquemático do leito fluidizado.
(CÁRDENAS-FONSECA, 2009).

Figura 3.7. Distribuidor de gás tipo placa porosa apoiada sobre o flange.

Visando obter a equação da queda de pressão através da placa porosa (ΔP_d) para posterior subtração da queda de pressão através do leito de partículas na coluna principal (ΔP_L), foram feitos testes sem material particulado na coluna do leito. A queda de pressão através da placa foi medida em função da velocidade do ar. A Fig. 3.8, foi construída a partir dos dados medidos em três repetições do teste.

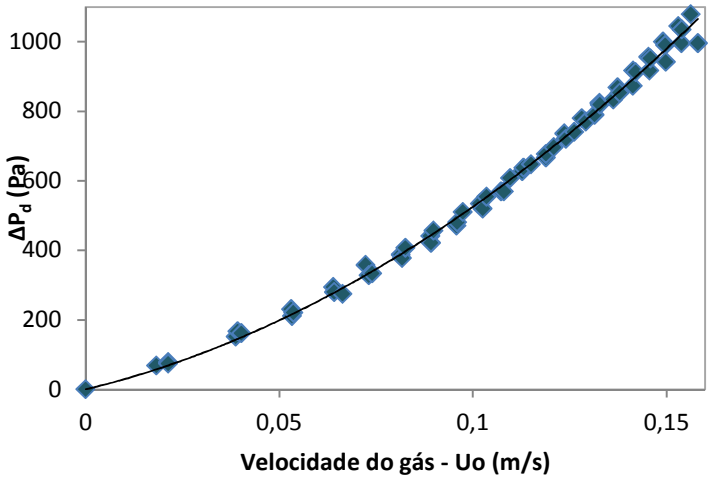


Figura 3.8. Curva característica da queda de pressão no distribuidor de tipo placa porosa.

A queda de pressão no distribuidor do tipo placa porosa usada nos testes foi obtida através do ajuste dos pontos experimentais, sendo representada pela Eq. (3.15), que apresenta coeficiente

de correlação igual a 0,9964.

$$\Delta P_d = 25605\ Uo^2 + 2691{,}8\ Uo \quad (3.15)$$

3.4.1. Instrumentação

Transdutores de pressão (Smar, modelo LD 301D, faixa de medição de 0 a 5000 mmH_2O, tempo de resposta de 100 ms, exatidão de ± 0,004% do fundo de escala) foram utilizados para a determinação da queda de pressão no leito somada à da placa distribuidora ($\Delta P_L^{'}$), queda de pressão através do medidor de placa de orifício (ΔP_{or}) e pressão à montante da placa de orifício (P_{mon}) (Fig. 3.9).

O sinal de saída dos transdutores é em corrente de 4 a 20 mA, sendo convertido em tensão e enviado a um sistema de aquisição de dados.

Figura 3.9. Transdutor de pressão SMAR modelo LD 301D.
(http://www.smaruk.co.uk/products/HART_Pressure_Transmitters.asp)

Para a ligação dos transdutores, foi usada uma bateria de 24 V-DC. A Fig. 3.10 apresenta o esquema da conexão do sensor.

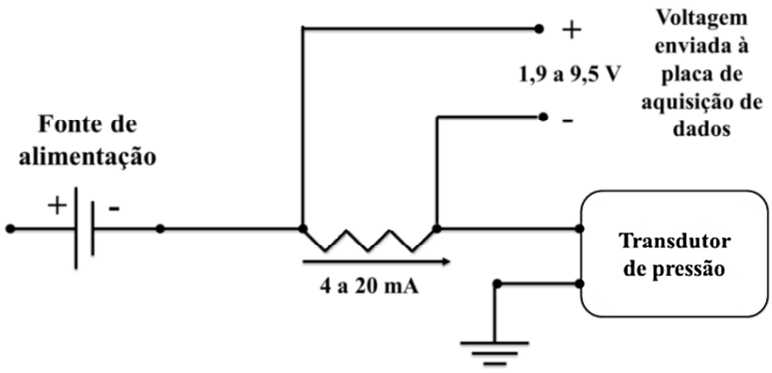


Figura 3.10. Diagrama de conexão do transdutor de pressão SMAR modelo LD301D.

A conexão física do transdutor conectado ao sistema experimental é apresentada na Fig. 3.11, onde é possível verificar as tomadas de pressão no *plenum* (localizada 4 cm abaixo da placa porosa) e na coluna (localizada 30 cm acima do leito de partículas).

Figura 3.11. Transdutor de pressão SMART LD301D conectado ao sistema experimental.

A queda de pressão no leito (ΔP_L) foi determinada subtraindo-se a queda de pressão no distribuidor do valor de $\Delta P'_L$ medido (Eq. 3.16).

$$\Delta P_L = \Delta P'_L - \Delta P_d \tag{3.16}$$

Nas tomadas de pressão localizadas na coluna principal do leito (*plenum* e acima do leito),

foram utilizados filtros de tela fina para evitar o entupimento das mangueiras que ligam os transdutores à coluna.

No desenvolvimento dos experimentos, foram medidas as propriedades do ar no laboratório: pressão atmosférica, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. A pressão atmosférica foi medida através de um barômetro de Torricelli, mostrado na Fig. 3.12, juntamente com os termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido. Esses dados foram utilizados no cálculo da vazão de ar que atravessa o medidor de placa de orifício.

Figura 3.12. Instrumentação para medida das condições internas do laboratório (barômetro de Torricelli, termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido).

A vazão de ar na coluna principal foi determinada através de uma placa de orifício, item PO da Fig. 3.5, construída segundo a norma ASME MFC-14M-2003, utilizando as equações mostradas no Apêndice (A).

3.4.2. Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados usado para receber os sinais de pressão (Fig. 3.13) é composto por três partes: placa de aquisição de dados da National Instruments (NI) da série NI

USB – 6255, computador, e o software Labview para a análise dos dados. O objetivo deste sistema é adquirir o sinal de tensão da placa de aquisição de dados, transformá-lo em pressão, listar os dados num formato digital e salva-los num arquivo para ~~seu~~ posterior análise.

A placa de aquisição de dados possui as seguintes características:

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

O programa desenvolvido para a coleta dos dados de pressão está apresentado no Apêndice (B).

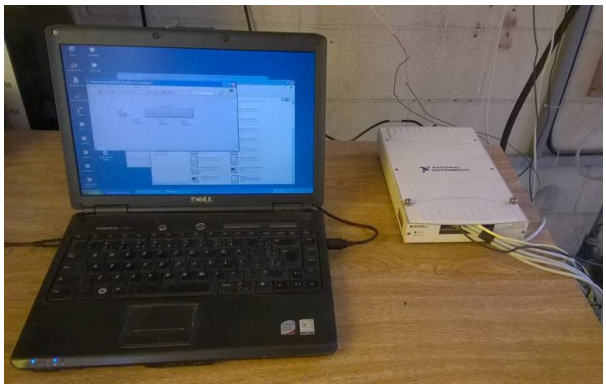


Figura 3.13. Sistema de aquisição de sinais do transdutor.

3.5. Procedimento experimental

Visando determinar as velocidades da fluidização características de leitos contendo misturas de partículas (U_{fi}, U_{mf} e U_{fc}) foi usado o método baseado na curva da queda pressão através do leito de partículas (ΔP_L) em função da velocidade superficial do gás (U_o). Assim, foi determinada a queda de pressão no leito (ΔP_L) para cada velocidade superficial do gás. Durante cada experimento, a vazão de ar foi ajustada através do controle do valor da pressão a montante,

V_1 segundo a Fig. 3.5, da placa de orifício (P_{mont}), sendo coletados valores de pressão (média de 1000 medidas de pressão para cada velocidade de gás ensaiada). Foram realizados três repetições para cada teste, sendo a U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} considerada como a média dos três valores encontrados.

A velocidade superficial do gás foi calculada a partir da vazão mássica de gás fornecida pela placa de orifício ($\dot{m}_g$), segundo a Eq. (3.17).

$$U_o = \frac{4\,\dot{m}_g}{\rho_g\,\pi\,D^2} \tag{3.17}$$

Onde D é o diâmetro interno da coluna contendo o leito de partículas e ρ_g é a massa específica do ar.

Antes do início de cada teste, verificou-se que não havia vazamentos de gás no sistema e que três repetições de cada teste foram realizadas. Tendo como referencia o sistema experimental descrito no início (Fig. 3.5) desta seção, os passos para a inicialização dos testes são descritos a seguir:

a. Ligar os instrumentos de medição (os transdutores de pressão e o termopar), placa de aquisição de dados e computador.
b. Montar e verificar a placa de orifício, PO, placa porosa, tomadas de pressão livres de entupimentos, conexões elétricas dos transdutores, ligações da placa de aquisição de dados ao computador.
c. Determinadas as massas dos componentes da mistura binária a ser estudada, segundo o método descrito no Apêndice (C), realizar a pesagem do material e armazená-los em recipientes diferentes.
d. A mistura binária é inserida na coluna principal do sistema experimental seguindo o método descrito por Formisani, De Cristofaro e Girimonte (2001), onde o material inerte (*jetsam*) é adicionado primeiramente, seguido pela adição da biomassa (*flotsam*). A Fig. 3.14 apresenta uma fotografia desta etapa, onde é possível ver as partículas da areia sob as partículas de bambu.
e. Ligado o computador e a placa de aquisição de dados, abrir o programa de aquisição de dados, descrito no apêndice B. Comprovar seu correto funcionamento coletando uma série de dados

sem ligar o compressor.

f. Verificar o correto funcionamento dos transdutores de pressão relizando a comprovação do seu zero, com ajuda da ferramenta de verificação de corrida (*run test*) do software da placa de aquisição *National instrument* NI USB 625.

Figura 3.14. Mistura binária carregada no leito antes de iniciar o teste.

g. Fechar a válvula V_1 à montante do leito, partir o compressor roots, ajustar a válvula de *by-pass* e verificar o correto funcionamento do compressor de ar. A válvula V_2 (*by-pass*) deve iniciar totalmente aberta.

h. Abrindo *V1, i*njetar ar na coluna até o leito chegar à fluidização completa do material (regime borbulhante), no caso de testes com misturas, assegurar que aconteça a mistura completa entre os componentes.

i. Reduzir gradativamente a vazão do ar, coletando os seguintes dados: queda de pressão no leito e placa distribuidora ($\Delta P'_L$), queda de pressão na placa de orifício (ΔP_{or}), pressão a montante da placa de orifício (P_{mont}) e temperatura do gás na entrada da coluna (T); até que a condição de leito fixo seja atingida.

No caso de testes com as misturas binárias foi monitorado o processo da fluidização visualmente, identificando-se a pressão onde ocorria o começo da segregação dos componentes e o ponto onde se observava uma boa qualidade da mistura, ou seja, elevada uniformidade do leito.

Durante os testes, procurou-se permanecer somente o tempo necessário para obtenção dos dados para cada vazão do gás ensaiada, para evitar que a segregação ocorresse. Caso esse

fenômeno fosse observado, a vazão do gás era aumentada de modo a promover a mistura efetiva entre os componentes e em seguida retornava-se à condição desejada para a medida.

Após a realização das etapas anteriores, construiu-se a curva de ΔP_L vs Uo. A U_{mf} foi determinada pela intersecção da curva ajustada obtida através dos pontos coletados correspondente ao regime de leito fixo, com a reta horizontal ajustada correspondente ao regime de leito fluidizado. Usando a ferramenta 'Formatar linha de tendência' no Excel, foi encontrada a equação da linha ajustada tanto para o regime de leito fixo quanto para o regime de leito fluidizado. A partir da interseção entre as duas retas obtêm-se o valor da U_{mf} (Fig. 3.15). As velocidades U_{fi} e U_{fc} foram estimadas a partir do ponto onde ocorria o afastamento entre os pontos experimentais e as retas ajustadas. No caso da U_{fc} seu valor foi constatado com a inspeção visual da mistura entre os componentes no leito. A Fig. 3.15 apresenta o comportamento fluidodinâmico de um teste para a mistura 95% de areia 3 e 5% de bambu *in natura* (H/D = 1), onde pode-se identificar o procedimento para obtenção de U_{fi}, U_{mf} e U_{fc}.

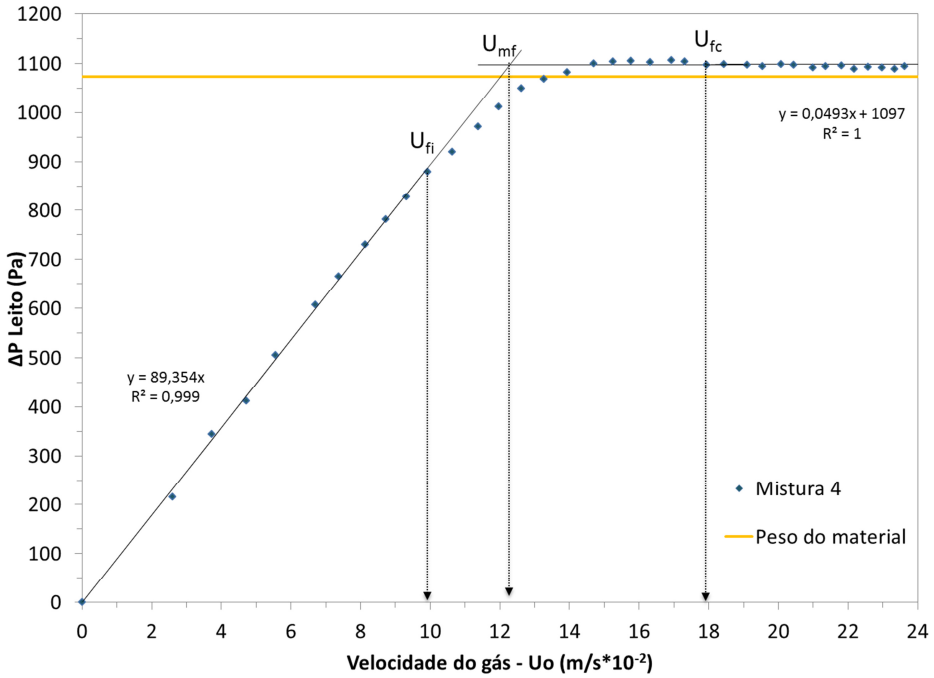


Figura 3.15. Curva fluidodinâmico da mistura binária 5% bambu e 95% de areia 3.

Os ensaios foram realizados para três diferentes alturas de leito empacotado naturalmente (0,10; 0,15 e 0,20 m) com o intuito de verificar-se a influência da altura do leito sobre a qualidade de fluidização.

A primeira etapa de ensaios fluidodinâmicos envolveu a determinação da influência do tamanho da areia sobre a qualidade de fluidização. Nesses testes areia (5 tamanhos diferentes) era misturada com as biomassas estudadas formando uma mistura binária contendo 5 % (em massa) de biomassa (bambu *in natura* ou carvão de bambu) e 95 % de areia. A relação *H/D* foi fixada no valor unitário (*H/D* = 1) nesta etapa.

A segunda etapa de ensaios fluidodinâmicos envolveu a determinação da influência da altura do leito sobre a qualidade da fluidização. Esses testes foram realizados com a areia que apresentou melhor qualidade de fluidização na etapa anterior e com a mesma proporção de biomassa na mistura estudada anteriormente, ou seja, 5 % de biomassa (bambu *in natura* ou carvão de bambu) na mistura.

A terceira etapa de ensaios fluidodinâmicos envolveu a determinação da influência da composição da mistura sobre a qualidade da fluidização. Para esses testes foi utilizada a areia que apresentou a melhor qualidade de fluidização na primeira etapa de testes, fixando a altura do leito no valor que apresentou melhor qualidade de fluidização na segunda etapa de ensaios. A composição da mistura deve variar entre 0 e 100 % (em massa) de biomassa no leito.

3.6. Avaliação do comportamento fluidodinâmico a partir das velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} obtidas

Os resultados de U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} obtidos nos testes fluidodinâmicos em cada etapa de ensaios, descritas no item 3.5, foram analisados a partir da construção de tabelas e figuras, procurando-se verificar a influência do tamanho do material inerte, da razão $dp_{biomassa}/dp_{areia}$, da razão H/D e da composição do leito. Adicionalmente procurou-se comparar os resultados obtidos nos testes com bambu *in natura* com os resultados obtidos nos testes com carvão de bambu, visando verificar o efeito do tratamento térmico sobre a fluidodinâmica do leito.

Na avaliação do efeito da composição da mistura, verificou-se o comportamento do parâmetro U_{mf}/U_{fc} visando avaliar a qualidade da fluidização uma vez que a redução na faixa em que ocorre a segregação da mistura aproxima a referida razão de velocidades ao valor unitário.

Vários outros parâmetros foram testados:

- U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} vs dp;
- U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} vs $dp_{biomassa}/dp_{areia}$;
- U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} vs H/D;
- U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} vs x_b;

Conforme sugerido na revisão da literatura apresentada no capítulo 2, entretanto, nenhuma delas forneceu informação adicional àquela fornecida na análise do parâmetro U_{mf}/U_{fc} .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capitulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a caracterização dos materiais particulados estudados: cinco tamanhos diferentes de areia, bambu moído *in natura* e carvão de bambu produto do processo de pirólise a 500 °C. Adicionalmente são apresentados os resultados obtidos nos testes fluidodinâmicos que definiram o tamanho das partículas de areia, a altura do leito e a composição da mistura que apresentaram a melhor qualidade de fluidização. Os valores das velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para cada mistura ensaiada foram obtidos a partir da construção e análise da curva fluidodinâmica, conforme descrito no capítulo "Materiais e métodos". Nas figuras mostradas neste capitulo estão mostrados os resultados obtidos em apenas um dos testes, dentre as três repetições realizadas. Os resultados obtidos em todos os ensaios fluidodinâmicos realizados estão mostrados no Apêndice D.

4.1. Caracterização do material

Fotografias dos materiais estudados nesta pesquisa, que consistem de cinco tamanhos diferentes de areia, bambu moído *in natura* e carvão de bambu, produto do processo de pirólise lenta a 500 °C, são apresentadas na Fig. 4.1.

A Figura 4.2 apresenta a distribuição granulométrica do bambu *in natura* para as três repetições realizadas. O diâmetro médio de Sauter (Eq. 3.1) para os testes 1, 2 e 3 foram, respectivamente, 806, 833 e 821 μm, levando ao valor médio de 820 ± 14 μm.

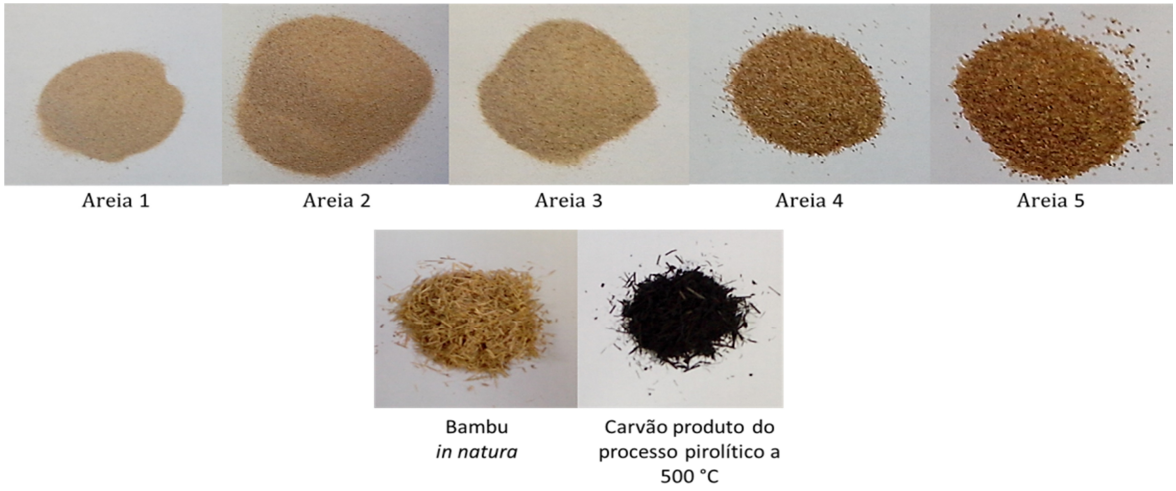


Figura 4.1. Fotografias dos materiais utilizados nesta pesquisa: cinco tamanhos de areia, bambu moído *in natura* e carvão de bambu oriundo de processo de pirólise lenta a 500 ºC.

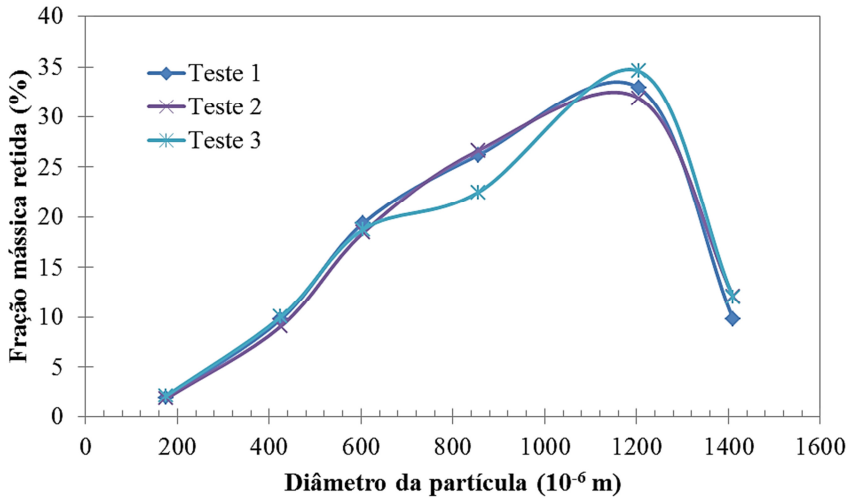


Figura 4.2 Distribuição granulométrica do bambu *in natura*.

A Figura 4.3 apresenta a distribuição granulométrica do carvão de bambu resultando em diâmetro médio de Sauter para os testes 1, 2 e 3 de 534, 537 e 502 μm, respectivamente, levando ao valor médio de 525 ± 19 μm.

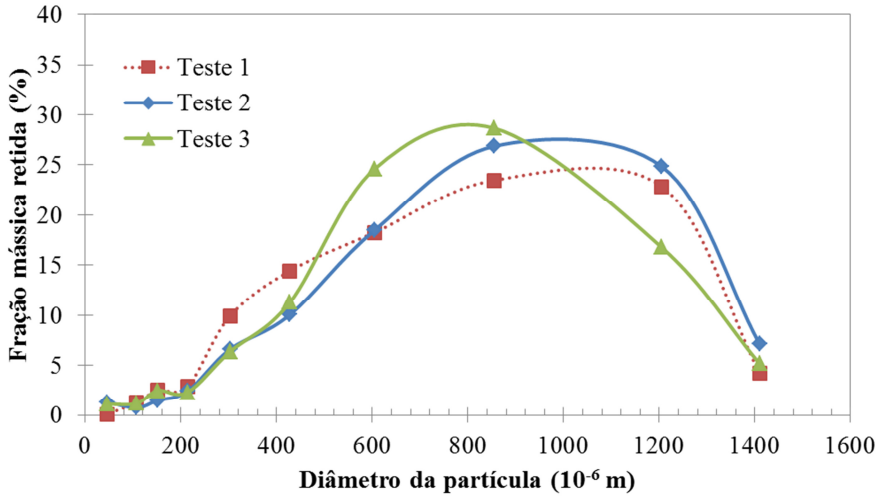


Figura 4.3. Distribuição granulométrica do carvão de bambu.

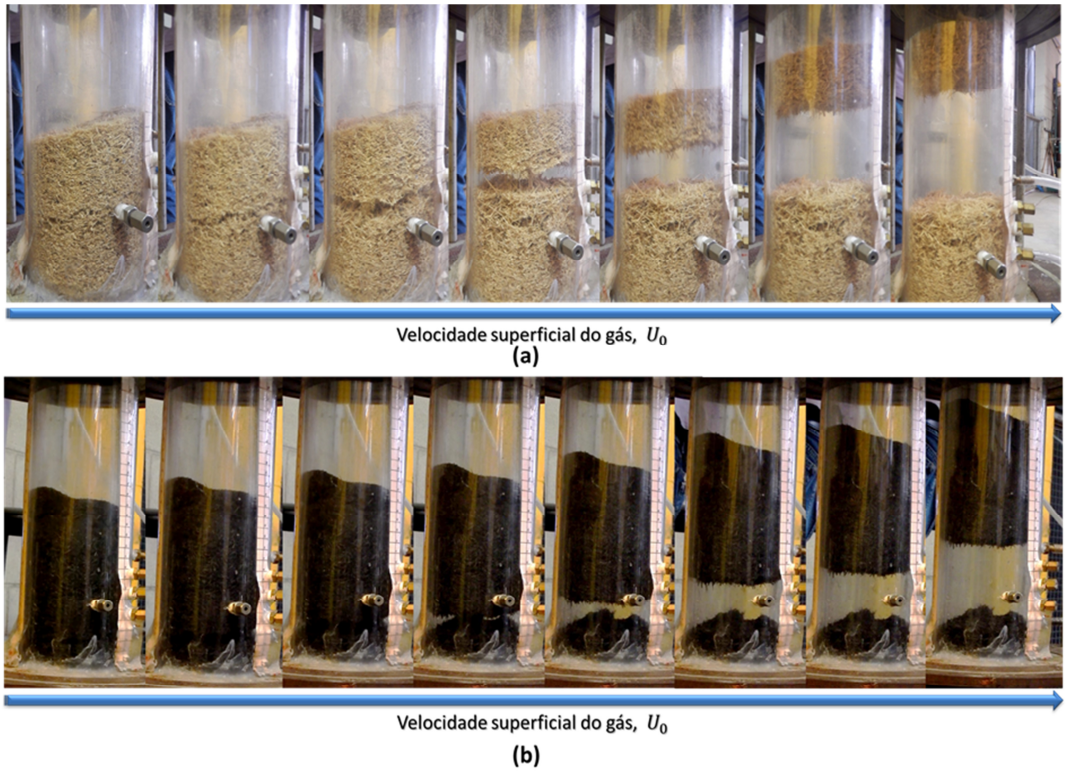


Figura 4.4. Imagens do leito de bambu *in natura* (a) e de carvão de bambu (b) em função da velocidade superficial do gás.

O leito composto por apenas bambu *in natura* e apenas carvão de bambu não apresentou o regime da fluidização borbulhante. Devido à geometria da biomassa, ao formato alongado e irregular das suas partículas que se entrelaçam surge o regime empistonado à medida que a vazão de ar é aumentada. Ao fornecer uma vazão do ar elevada para tentar chegar a uma fluidização completa, observava-se a formação de uma bolha com diâmetro igual ao do leito, não sendo observado o regime borbulhante, conforme mostrado na Fig. 4.4.

Os resultados da caracterização dos materiais particulados usados nesta pesquisa são apresentados na Tab. 4.1. A Fig. 4.5 apresenta a classificação de cada material segundo Geldart (1973). Essa classificação leva em consideração apenas o diâmetro e a densidade das partículas, podendo levar a um desvio do comportamento esperado quando dados provenientes de biomassa são utilizados devido à dificuldade de definir-se um valor para o diâmetro das partículas em função de sua baixa densidade e variedade de formatos diferentes.

Tabela 4.1. Características físicas dos materiais particulados.

Propriedades	**Bambu**	**Carvão**	**Areia 1**	**Areia 2**	**Areia 3**	**Areia 4**	**Areia 5**
Faixa granulométrica (μm)	178 a 1410	88 a 1410	212 a 250	297 a 350	420 a 500	595 a 710	840 a 1000
$\bar{d}_p$ (μm)	820 ± 14	525 ± 19	231 ± 7	324 ± 9	460 ± 12	653 ± 16	920 ± 21
ρ_p (kg/m^3)	1353 ± 125	936 ± 93	2650 ± 9	2658 ± 14	2587 ± 21	2634 ± 66	2616 ± 42
ρ_m (kg/m^3)	177 ± 14	212 ± 3	1492 ± 5	1504 ± 19	1524 ± 13	1426 ± 18	1480 ± 6
$\varepsilon_m = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_p}$(-)	0,87 ± 0,02	0,77 ± 0,02	0,44 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,46 ± 0,04	0,43 ± 0,01
ϕ	0,11 ± 0,03	0,14 ± 0,02	0,68 ± 0,01	0,64 ± 0,01	0,66 ± 0,01	0,69 ± 0,01	0,71 ± 0,01
$\gamma = \phi\ dp$ (10^{-6}m)	90 ± 2	74 ± 12	143 ± 3	188 ± 3	278 ± 4	403 ± 3	566 ± 7
U_{mf} (10^{-2} m/s)	nf	nf	3,0 ± 0,1	6,4 ± 0,2	10,7 ± 0,5	32,7 ± 0,7	54,1 ± 0,5
Classificação de Geldart	B	B	B	B	B	D	D

nf = Regime de fluidização borbulhante não foi alcançado

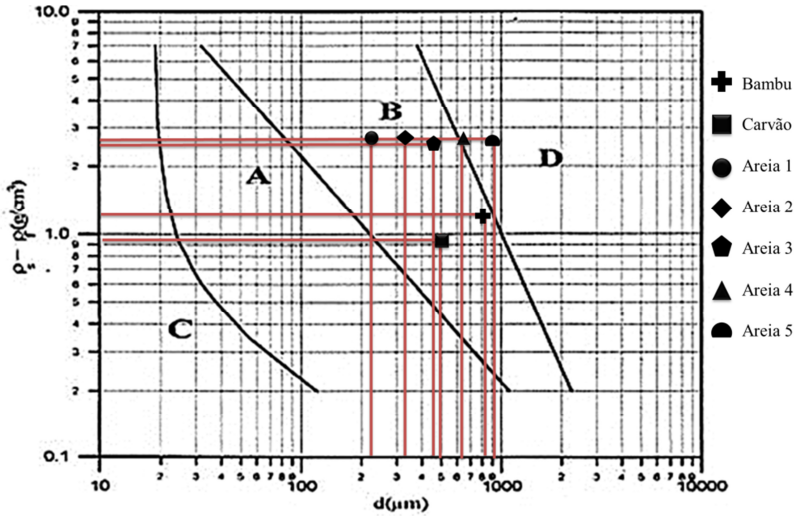


Figura 4.5. Classificação das partículas estudadas segundo Geldart (1973).

As localizações dos pontos, correspondentes a cada tipo de partícula testado e mostrados na Fig. 4.5, indicam que apenas as areias 4 e 5 pertencem ao grupo D de Geldart, sendo que a areia 4 encontra-se muito próxima à linha divisória entre os grupos B e D. Todos os demais materiais estudados pertencem ao grupo B de Geldart. Também é possível verificar que o ponto que representa as partículas de bambu *in natura* está muito próximo da linha que limita os materiais do tipo B e D. Esse resultado, reflexo das características físicas da biomassa *in natura*, insere grandes dificuldades ao processo da fluidização, pois suas partículas têm tendência a se arranjar de tal forma que configura um estado aglomerado que favorece a circulação do ar através do aparecimento de canais preferenciais. Essa questão não se apresenta com o carvão produto do processo pirolítico (Fig. 4.4), embora ele tampouco exiba o estado fluidizado. O carvão de bambu apresenta uma redução de 36% no tamanho das partículas e 31% na sua densidade aparente em relação à partícula de bambu *in natura.* O carvão apresenta maior distribuição entre as faixas de tamanho das partículas (Fig. 4.3) que o bambu *in natura* (Fig. 4.2). Os resultados indicam que o bambu *in natura* apresenta características mais difíceis de serem determinadas, prevendo que uma boa qualidade de fluidização seja mais difícil de ser alcançada quando comparada com o carvão de bambu. Características que coincidem com as relatadas por Chok, Gorin e Chua (2010) ao usar misturas de casca de palma e areia, a geração de canais preferenciais favoreceu a segregação e a baixa qualidade da fluidização.

4.2. Influência do tamanho da areia na fluidização de misturas binárias biomassa-areia

Conforme comentado na Seção 3.5, os ensaios para verificação da influência do tamanho da areia sobre a fluidodinâmica da fluidização foram realizados fixando-se a relação *H/D* igual à unidade e a composição do leito em 5 % de biomassa na mistura. Antes da adição da biomassa no leito, realizaram-se ensaios fluidodinâmicos com apenas areia no leito, visando verificar as alterações no comportamento da fluidização com a adição de 5 % de bambu moído *in natura* e com a adição de 5 % de carvão de bambu.

Os ensaios realizados com a areia de maior tamanho (areia 5, $\overline{dp} = 920\ \mu m$) apresentaram comportamento típico de partículas da classificação D de Geldart. O leito comportou-se de forma irregular e instável, gerando grandes bolhas que alcançavam mais da metade do diâmetro da coluna, como pode ser verificado na Fig. 4.6.

Figura 4.6. Imagens do leito composto apenas pela areia mais grossa (areia 5, $\overline{dp} = 920\ \mu m$, *H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 95% de areia 5 e 5% bambu *in natura*, observou-se o surgimento do regime empistonado, como mostrado na Fig. 4.7. Verificou-se a presença de canais preferenciais durante os testes fluidodinâmicos para esta mistura, observando-se a combinação dos efeitos observados nos testes realizados com cada um dos materiais isoladamente (formação de grandes bolhas no caso da areia; e surgimento do regime empistonado com a presença de canais preferenciais no caso do bambu *in natura*). Não se obteve

uma mistura efetiva entre os dois materiais e ocorreram instabilidades nas medidas de pressão, com a tendência ao regime de leito empistonado nas maiores velocidade do gás.

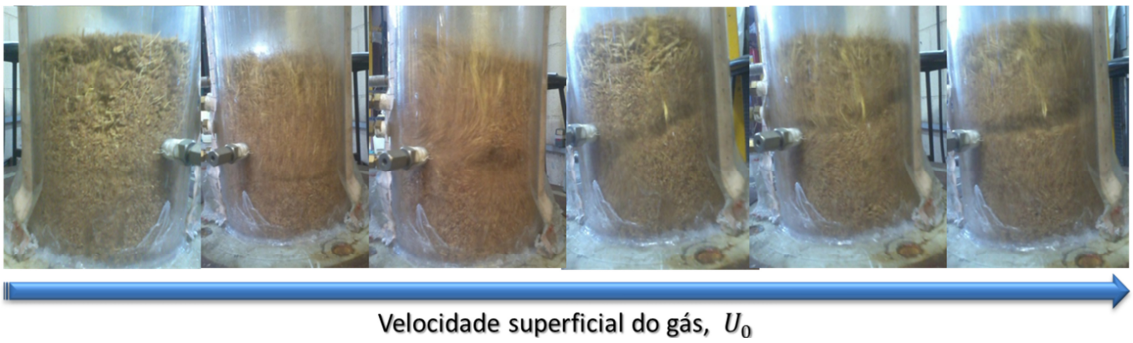


Figura 4.7. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 5 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 5% de bambu in natura (*H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 95% de areia 4 ($\overline{dp}$ = 653 μm) e 5 % de bambu *in natura,* verificou-se a formação de bolhas grandes, que não chegaram a atingir o diâmetro da coluna, dessa forma não se verificam grandes instabilidades, características do regime empistonado (Fig. 4.8). Não foi observada uma boa mistura dos materiais. Nos testes com essa areia também se verificou a presença constante de canais preferenciais devido à segregação das partículas, com o agrupamento das partículas de bambu *in natura* no fundo no leito.

Figura 4.8. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 4 ($\overline{dp}$ = 653 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5%

de bambu *in natura*, o leito apresentou boa qualidade de fluidização, gerando uma boa mistura dos materiais no regime de fluidização borbulhante. O comportamento pode ser observado na Fig. 4.9, onde são mostradas duas fotografias do leito para três diferentes condições operacionais testadas. Na condição onde a velocidade superficial do gás (U_o) era mais elevada (Fig. 4.9c) verificou-se uma boa mistura entre os materiais, com a presença de bolhas pequenas no leito. Com a redução da U_o (Fig. 4.9b) observou-se o início da segregação das partículas, com o aumento da concentração de partículas de bambu no topo do leito. Nesta situação a areia ainda encontrava-se fluidizada. Ao diminuir ainda mais a velocidade do gás, observou-se maior acumulo de partículas de bambu no topo do leito (Fig. 4.9a). Nesse ponto a areia encontra-se em fluidização incipiente e as partículas de bambu ainda estavam em regime de leito fixo.

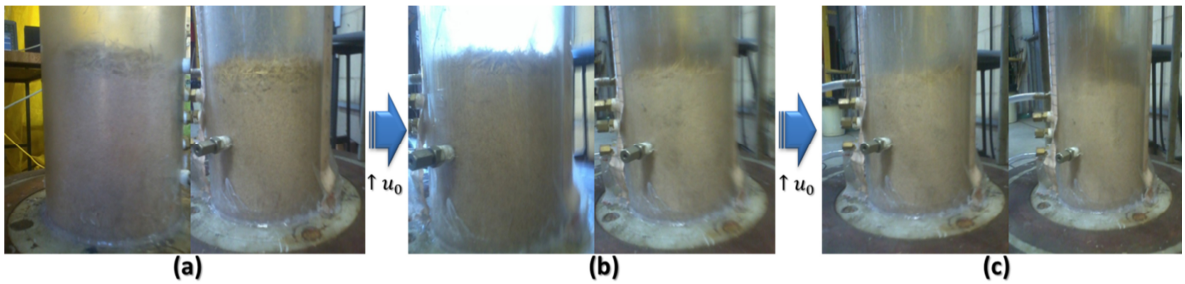


Figura 4.9. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% da areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 95% de areia 2 ($\overline{dp}$ = 324 μm) e 5% de bambu *in natura*, verificou-se uma forte tendência à segregação, resultando em fluidização de baixa qualidade. A Fig. 4.10 mostra duas fotografias tiradas do leito para três condições operacionais diferentes. A condição de melhor mistura entre os componentes ocorre para o maior valor de U_o (Fig. 4.10c). A segregação é muito rápida quando ocorre a redução de U_o, com acúmulo de partículas de bambu no topo do leito (Fig. 4.10b e 4.10a).

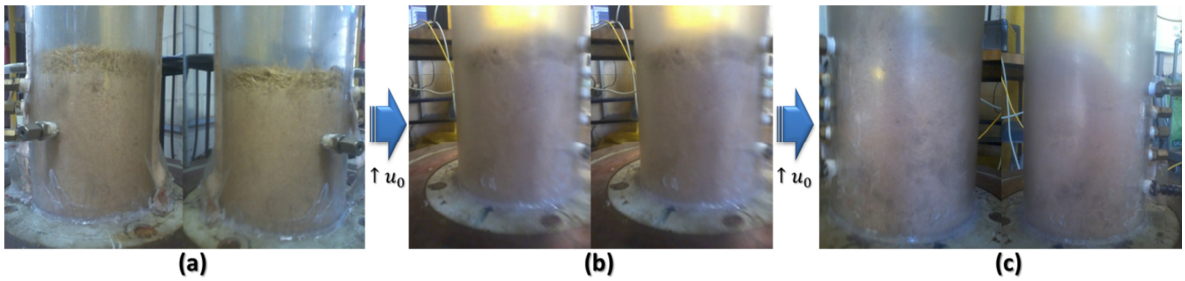


Figura 4.10. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% da areia 2 ($\overline{dp}$ = 324 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo, 95% de areia 1 ($\overline{dp}$ = 231 μm) e 5% de bambu *in natura*, o leito apresentou uma fluidização de qualidade baixa, gerando a rápida separação entre os materiais em velocidades próximas à de mínima fluidização da mistura. A Fig. 4.11 mostra duas fotografias do leito para três condições operacionais diferentes. Na Fig. 4.11c observa-se um grau elevado de borbulhamento da areia e um pequeno acúmulo de partículas de bambu no topo do leito. À medida que a velocidade superficial do gás era reduzida observava-se a rápida segregação dos materiais com aumento do acúmulo de biomassa no topo (Fig. 4.11b e 4.11a).

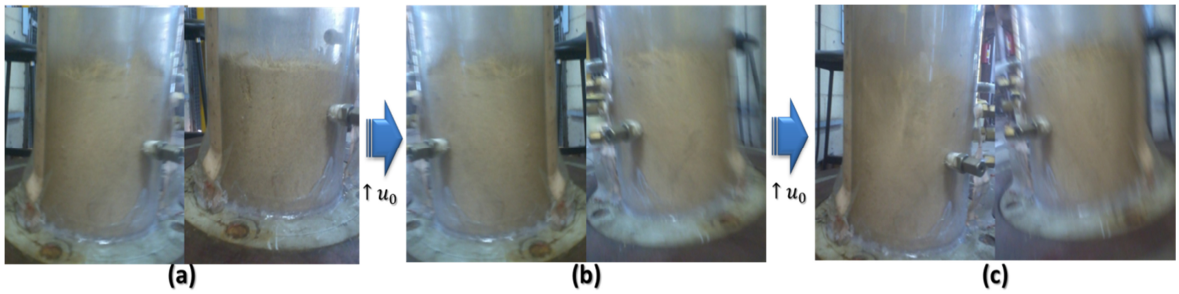


Figura 4.11. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% da areia 1 ($\overline{dp}$ = 231 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).

A Figura 4.12 apresenta as curvas fluidodinâmicas obtidas nos ensaios com leitos compostos apenas pelos 5 tipos de areia testados ($\overline{dp}$= 920, 653, 460, 324 e 231 μm), além das curvas obtidas para as misturas correspondentes compostas por 95% de areia e 5% de bambu *in*

natura. Apenas um dos testes de cada mistura foi mostrado para permitir uma melhor visualização das diferenças observadas.

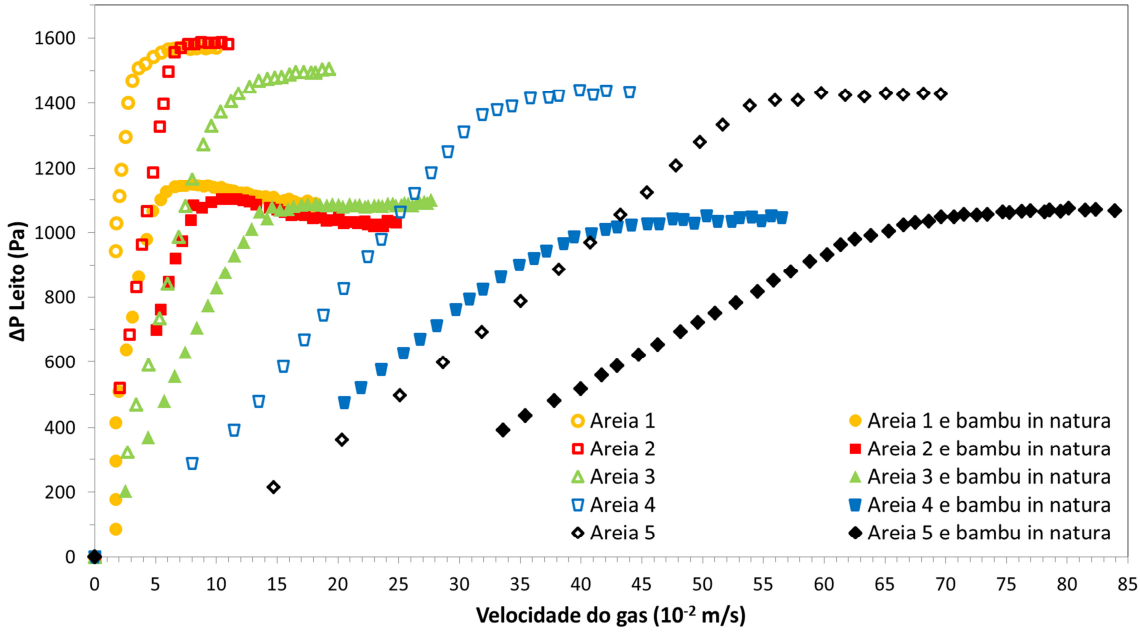


Figura 4.12. Curvas fluidodinâmicas para os cinco diferentes tamanhos de areias testados e para as misturas binárias contendo 95% de areia e 5% de bambu *in natura*, (H/D = 1).

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios da massa e da U_{mf} obtidos nos testes com apenas areia no leito.

Tabela 4.2. Velocidade de mínima fluidização das areias estudadas.

Areia	$\overline{dp}$ (10^{-6} µm)	Massa do leito (10^{-3} kg)	U_{mf} (10^{-2} m/s)
1	231 ± 7	1172 ± 13	3,0 ± 0,1
2	324 ± 9	1181 ± 20	6,4 ± 0,2
3	460 ± 12	1197 ± 16	10,7 ± 0,5
4	653 ± 16	1120 ± 19	32,7 ± 0,7
5	920 ± 21	1162 ± 14	54,1 ± 0,5

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios da U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} obtidos, considerando os três testes realizados para cada mistura.

Tabela 4.3. Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} dos testes fluidodinâmicos para cinco tamanhos de areias em misturas binárias com 95% de areia e 5% de bambu *in natura*.

Areia presente na mistura	Massa do leito (10^{-3} kg)	U_{fi} (10^{-2} m/s)	U_{mf} (10^{-2} m/s)	U_{fc} (10^{-2} m/s)
1	854 ± 23	4,4 ± 0,4	4,8 ± 0,3	14,7 ± 0,3
2	859 ± 24	7,5 ± 1,1	8,1 ± 0,9	21,2 ± 0,8
3	867 ± 24	10,6 ± 0.7	13.3 ± 1.1	17,5 ± 0,5
4	828 ± 23	39,4 ± 0,9	41,6 ± 1,8	46,6 ± 1,0
5	850 ± 22	59,3 ± 1,9	64,7 ± 1,5	75,3 ± 0,8

Comparando a U_{mf} do leito composto por apenas areia e a U_{mf} do leito com a mistura areia-bambu (do mesmo tamanho), tem-se que a U_{mf} aumentou entre 20% (mistura bambu-areia 5) e 60% (mistura bambu-areia 1), conforme pode ser verificado a partir dos resultados mostrados nas Tabs. 4.2 e 4.3. Para as duas areias mais grossas (areias 4 e 5), o termo inercial (velocidade quadrática) da equação de Ergun, Eq. (4.1) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991), teve maior relevância e o comportamento do leito fixo destas duas misturas apresenta uma tendência que afasta-se do ajuste linear. Por outro lado, a tendência da curva correspondente ao leito fixo para as misturas binárias com as areias 1, 2 e 3 foi claramente linear (Fig. 4.12).

$$\frac{\Delta P_L}{H} = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\mu}{(\emptyset dp)^2}U_0 + 1{,}75\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\frac{\rho_g}{\emptyset dp}{U_0}^2 \tag{4.1}$$

A redução do peso do leito contendo as misturas areia-bambu *in natura* em relação ao do leito composto por apenas areia, variou entre 26 e 28% (Tabs. 4.2 e 4.3). Essa diferença ocorre em função da menor densidade e da maior porosidade do leito contendo partículas de bambu em relação ao leito contendo apenas areia (Tab. 4.1).

Considerando as misturas contendo 5 % de partículas de bambu *in natura* e os cinco tamanhos de areia, observou-se que o tamanho do material inerte alterou consideravelmente o comportamento fluidodinâmico do leito. Verificou-se uma pronunciada segregação no leito contendo a areia mais fina (areia 1) e a presença de canais preferenciais e aglomeração das partículas que favoreceram o surgimento do regime empistonado no leito contendo a areia mais grossa (areia 5).

A Figura 4.13 apresenta os pontos experimentais obtidos bem como as linhas de tendência observadas para as velocidades de fluidização em função do diâmetro da areia (Fig. 4.13a) e da razão $dp_{biomassa}/dp_{areia}$ (Fig. 4.13b). Verifica-se que a utilização de partículas menores de material inerte, provoca a redução das velocidades de fluidização (Fig. 4.13a), como era esperado. A redução do diâmetro da areia de 920 µm (areia 5) para 231µm (areia 1) provocou a redução de 93% no valor da U_{fi}, 93% no valor da U_{mf} e 80% no valor de U_{fc}. Observações semelhantes foram descritas por Bilbao, Lezaun e Abanades (1987) em leitos contendo misturas de palha e areia e por Chok, Gorin e Chua (2010) em leitos contendo casca de palma e areia. Nesse último trabalho citado, os autores relataram que a redução do tamanho da areia de 395 μm para 196 μm provocou uma redução de 61% no valor da U_{mf} e 59% no valor da U_{fc}.

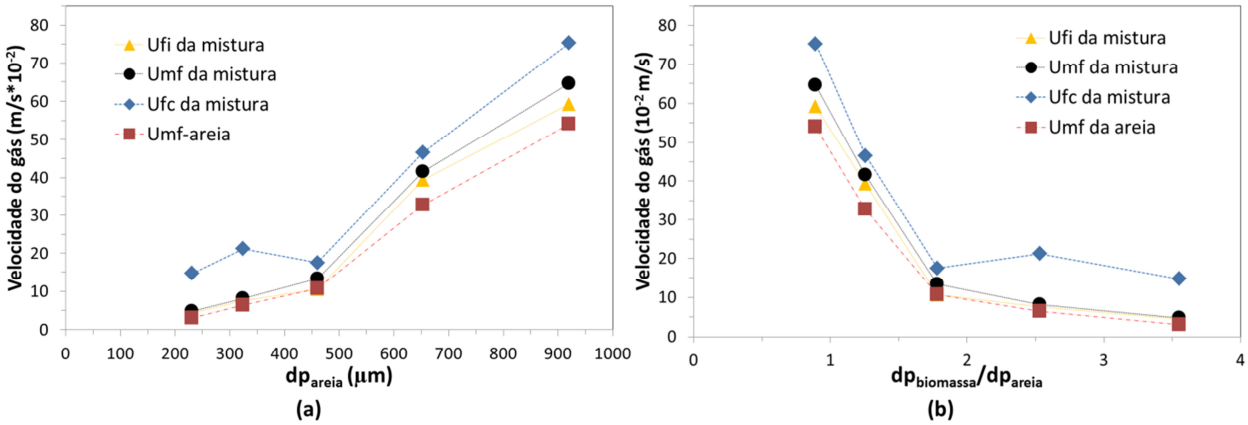


Figura 4.13. Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} em função do (a) dp_{areia} e da (b) relação $dp_{biomassa}/dp_{areia}$ em misturas binárias com 95% de areia e 5% de bambu *in natura*.

Devido à proximidade da densidade e da esfericidade das cinco areias testadas, a relação $dp_{biomassa}/dp_{areia}$ torna-se um parâmetro importante para a comparação dos resultados. Essa consideração foi apresentada por Tannous e Mizonov (2009) para estudar o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias contendo biomassa (casca de arroz) e material inerte (alumina), com razões mássicas biomassa/inerte de 2,5 a 15%. Nesse trabalho 3 diferentes razões de tamanhos de partículas, ($dp_{biomassa}/dp_{inerte}$) foram estudadas (5,4; 17,6 e 24,2). Nos testes apresentados pelos autores, a razão de densidade manteve-se praticamente constante e seus

resultados mostraram que para manter o leito bem misturado (fluidização completa) deveria ser utilizada-uma velocidade de operação de 2 a 7 vezes a $U_{mf,}$ quando razões de diâmetro ($dp_{arroz}/dp_{alumina}$) superiores a 17,6 estavam presentes no leito. Verificaram também que para a menor razão de diâmetro testada (5,4), a velocidade de operação deveria ser somente 1,5 a 2,5 vezes a U_{mf}. No estudo atual pode-se observar que nos testes com as areias 3 e 4 ($dp_{biomassa}/dp_{areia}$ igual a 1,8 e 1,3, respectivamente), ocorreram maior proximidade entre as velocidades de fluidização e melhor mistura entre os materiais, conforme comprovado pela análise visual do leito. Para essas areias a velocidade de fluidização completa foi de 1,1 a 1,3 vezes superior à U_{mf} da mistura, o que está coerente com o resultado apresentado em Tannous e Mizonov (2009). É de ressaltar que no caso da areia 3 ($\overline{d_p} = 460\,\mu m$) observa-se uma boa aproximação entre os valores obtidos para U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} (Fig. 4.13a e 4.13b) o que indica a mistura efetiva entre biomassa e inerte.

4.3. Influência da altura do leito na fluidização de misturas binárias biomassa-areia

A verificação da influência da altura do leito foi realizada com a mistura contendo 95 % de areia 3 ($\overline{dp} = 460\ \mu m$) e 5 % de bambu *in natura*, pois foi a areia 3 que apresentou a melhor qualidade de fluidização, conforme relatado no item 4.2. Os resultados dos testes com essa areia e altura do leito igual ao diâmetro da coluna (*H/D* = 1) foram discutidos no item 4.2 e apresentados na Fig. 4.9.

No teste fluidodinâmico com a relação *H/D* igual a 1,5 verificou-se uma maior dificuldade para a mistura dos materiais em relação aos resultados obtidos para *H/D* igual à unidade. Novamente observou-se a tendência de acúmulo de partículas de biomassa no topo do leito, como pode ser visualizado na Fig. 4.14. A melhor mistura ocorreu para as maiores velocidades do gás testadas (Fig. 4.14c), mas nessas condições o tamanho das bolhas geradas próximas à superfície do leito eram consideravelmente maiores que as observadas no leito onde *H/D* era igual à unidade, prejudicando o processo de mistura entre as partículas. A redução da velocidade do gás

provocava a segregação do material e o entrelaçamento das partículas de bambu presentes no topo do leito.

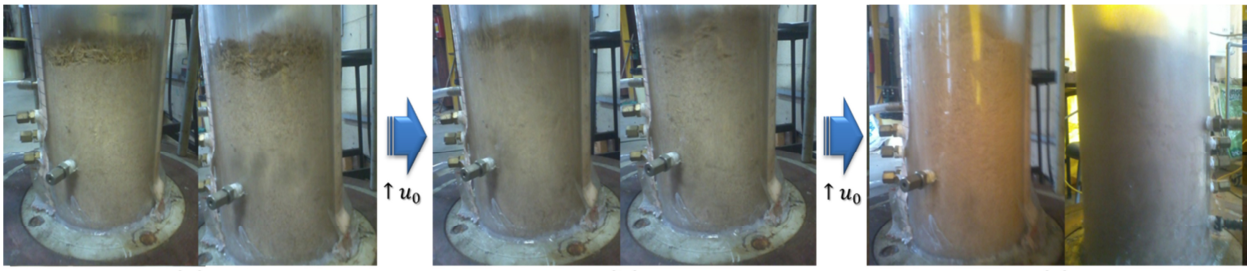


Figura 4.14. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1,5).

Observou-se ainda que para *H/D* igual a 1,5 ocorria maior número de formação de canais preferenciais, como mostrado na Fig. 4.15.

Figura 4.15. Imagens dos canais preferencias no teste fluidodinâmico da mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1,5).

Os testes realizados para a relação *H/D* igual a 2 apresentou comportamento semelhante ao observado para *H/D* igual a 1,5, com a presença de maior número de canais preferenciais e surgimento do regime de leito empistonado, como mostra a Fig. 4.16. A mistura dos materiais presentes no leito foi muito difícil de ser obtida, não tendo sido eficiente.

Figura 4.16. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* (*H/D* = 2).

A Figura 4.17 apresenta as curvas fluidodinâmicas obtidas para os leitos com a relação *H/D* igual a 1, 1,5 e 2; compostos por misturas binárias contendo 5% de bambu *in natura* e 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm). Apenas um dos testes de cada mistura foi mostrado para permitir uma melhor visualização das diferenças observadas.

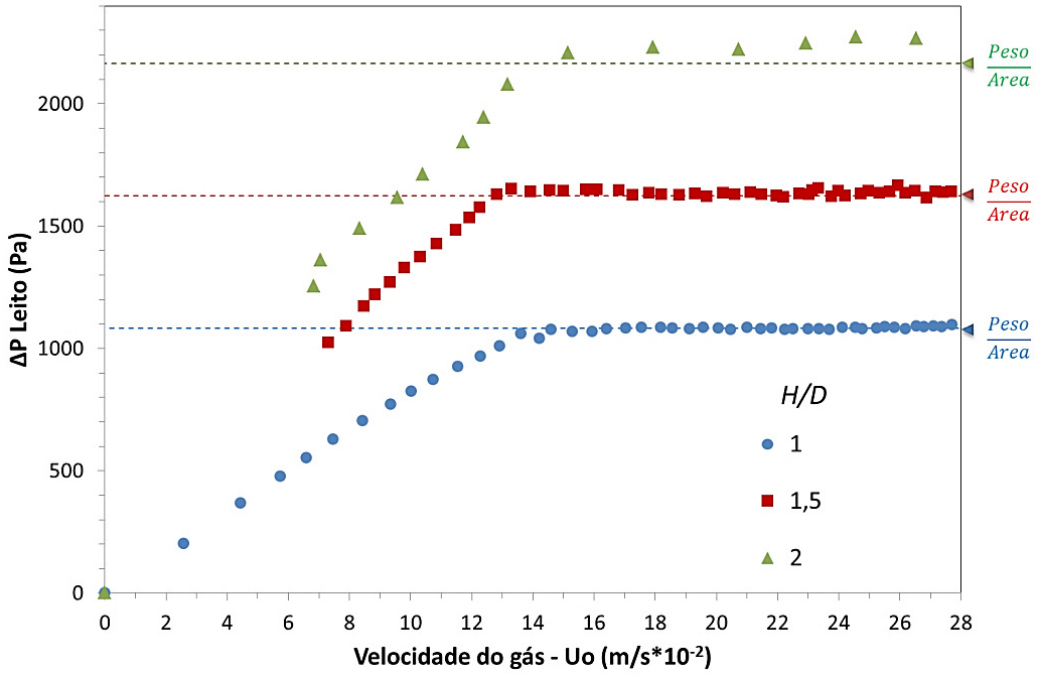


Figura 4.17. Curvas fluidodinâmicas para três relações *H/D* com a mistura binária composta por 5% de bambu in natura e 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm).

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios obtidos considerando as três repetições realizadas.

Tabela 4.4. Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para a mistura binária composta por 5% de bambu *in natura* e 95% de areia 3 ($\overline{dp} = 460\,\mu m$) em função da relação *H/D*.

H/D	Massa do leito (10^{-3} kg)	U_{fi} (10^{-2} m/s)	U_{mf} (10^{-2} m/s)	U_{fc} (10^{-2} m/s)
1	867 ± 24	10,6 ± 0,7	13,3 ± 1,1	17,5 ± 0,5
1,5	1031 ± 35	10,7 ± 1,0	12,9 ± 1,1	18,0 ± 0,8
2	1665 ± 47	12,2 ±1,8	14,4 ± 1,4	26,6 ± 1,7

O aumento da altura estática do leito (*H*) provocou o aumento da diferença entre as velocidades de início da fluidização e de fluidização completa (U_{fc} - U_{fi}) prejudicando a qualidade da fluidização (Tab. 4.4), como é apresentado na Fig. 4.18.

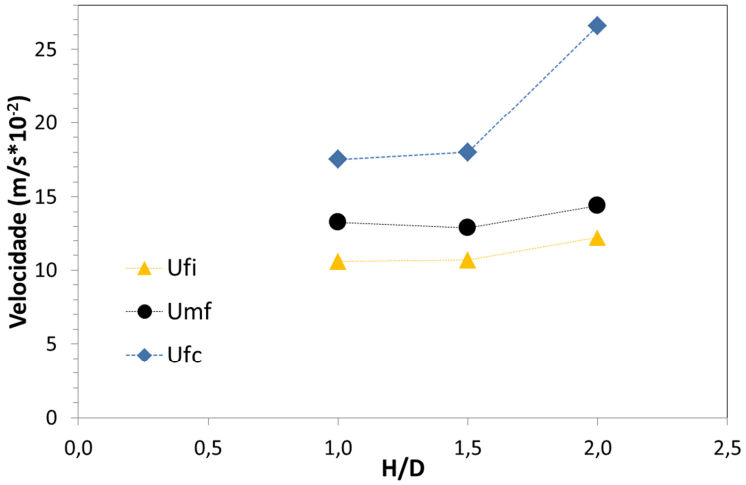


Figura 4.18. Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} em função da relação *H/D* em misturas binárias.

O aumento da razão *H/D* de 1 para 1,5 praticamente não gerou alteração nos valores das velocidades inerentes à fluidização, sendo que a máxima variação observada foi de 3%, valor que está dentro da própria incerteza experimental da medida. Entretanto, o aumento da razão *H/D* de

1,5 para 2 provocou o aumento de 14% no valor de U_{fi}, 12% no valor de U_{mf} e 47% no valor de U_{fc} (Tab. 4.4). Esses resultados podem ser atribuídos à quantidade de biomassa na mistura cujas partículas entrelaçaram-se no topo do leito formando aglomerados. Esse fato levou à necessidade de elevados fluxos de ar para distribuir a biomassa no leito e gerar uma boa mistura. No trabalho de Tannous, Hemati e Laguerie (1998) não foi verificada a influência da razão *H/D* sobre os valores de U_{fi}, U_s e U_{fc}, quando seu valor passava de 1,6 para 2,4 em testes utilizando areias do tipo B e D da classificação de Geldart. Essa diferença de comportamento em relação ao obtido neste trabalho para a mudança de *H/D* de 1,5 para 2 pode ser atribuída ao efeito da forma irregular da biomassa, porosidade e densidade que altera consideravelmente as características do leito. Quanto maior for a quantidade de biomassa presente na mistura, maior será a tendência de geração de aglomerados no leito, causando maior dificuldade para o surgimento de uma fluidização uniforme o que exige a entrada de maiores quantidades de ar no leito (ROWE; NIENOW, 1976, BILBAO; LEZAUN; ABANADES, 1987, KUNII; LEVENSPIEL, 1991, BASU, 2006).

O efeito da altura do leito também foi estudado por Chok, Gorin e. Chua (2010) em testes com leito composto por casca de palma e areia. Os autores constataram que a geometria do leito foi um fator importante para a qualidade da fluidização.

Os resultados obtidos mostram que a faixa de velocidade superficial do gás onde a segregação do leito ocorre aumenta com a altura do leito, fato atribuído ao maior tamanho das bolhas e à formação de canais preferenciais, que favorecem o arraste do componente *flotsam* para o topo, levados na esteira das bolhas (ROWE; NIENOW, 1976, ZHANG; JIN; ZHONG, 2009). Verificou-se a necessidade de elevadas velocidades do gás para que fosse observada uma boa mistura entre os componentes do leito com *H/D* igual a 2.

Nos testes em que *H/D* era 1,5 (H = 0,15 m) verificou-se a formação de canais preferenciais (Fig. 4.15), o que favoreceu a segregação do leito com acúmulo de partículas de biomassa no topo. Efeito que aumentou para *H/D* igual a 2.

4.4. Influência da composição do leito na fluidização de misturas binárias areia-bambu *in natura* e areia-carvão

A verificação da influência da composição do leito na fluidização de misturas binárias areia-bambu *in natura* foi realizada com a areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm), a areia que apresentou a melhor qualidade de fluidização, discutido no item 4.2. As composições estudadas foram 2,5%, 5%, 7,5% e 10% (em massa) de bambu *in natura* no leito, conforme descrito no capitulo 3.

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 97,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 2,5% de bambu *in natura*, verificou-se uma pequena tendência à segregação, produzindo-se uma fluidização de alta qualidade do leito. A Fig. 4.19 mostra duas fotografias tiradas do leito para três condições operacionais diferentes. A condição de melhor mistura entre os componentes ocorre para o maior valor de U_o (Fig. 4.19c). A segregação ocorreu com a redução da U_o, gerando-se acúmulo de partículas de bambu no topo do leito (Fig. 4.19b e 4.19a).

O teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura* foi discutido na seção 4.2.

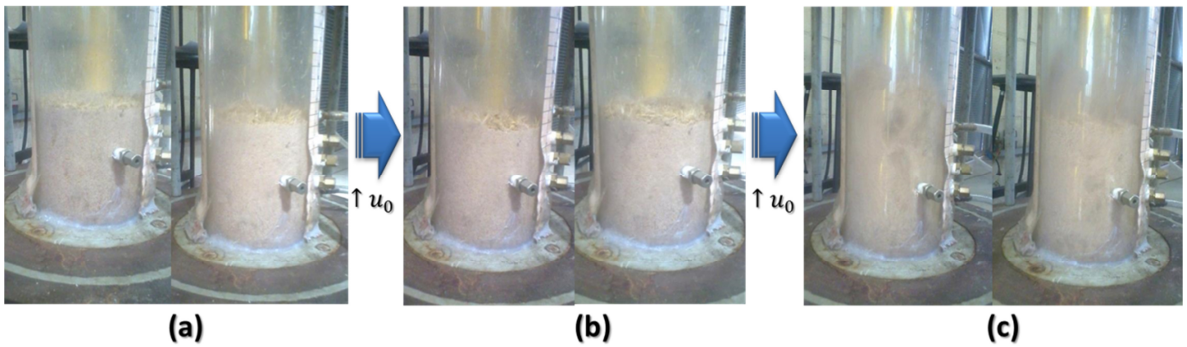


Figura 4.19. Imagens do leito contendo a mistura binária 97,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 2,5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 92,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 7,5% de bambu *in natura*, verificou-se uma alta tendência à segregação, resultando em fluidização de baixa qualidade devido ao entrelaçamento das partículas de bambu. O

comportamento pode ser observado na Fig. 4.20, onde são mostradas duas fotografias do leito para três diferentes condições operacionais testadas. Para as U_o mais elevadas (Fig. 4.20c) verificou-se a melhor condição de mistura entre os materiais, num regime fluidizado vigorosamente borbulhante. Com a redução da U_o (Fig. 4.20b) observou-se o rápido início da segregação das partículas, com o aumento da concentração de partículas de bambu no topo do leito, quanto a areia ainda encontra-se fluidizada. Ao diminuir ainda mais a velocidade do gás, observou-se maior acúmulo de partículas de bambu no topo do leito (Fig. 4.20a). Nesse ponto a areia encontrava-se em fluidização incipiente e as partículas de bambu encontravam-se em regime de leito fixo. Observou-se a presença de canais preferenciais.

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 90% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 10% de bambu *in natura*, verificou-se uma forte tendência à segregação, com a formação de bolhas grandes no leito gerando uma fluidização de qualidade muito baixa. A condição de melhor mistura entre os componentes ocorreu para o maior valor de U_o (Fig. 4.21c), num regime fluidizado vigorosamente borbulhante. Com a redução da U_o (Fig. 4.21b) observou-se o acúmulo de partículas de bambu no topo do leito, numa condição onde a areia ainda encontrava-se bem fluidizada. Ao diminuir ainda mais a U_o, observou-se maior acúmulo de partículas de bambu no topo do leito, apresentando regime de leito fixo (Fig. 4.21a). Neste ponto, observou-se a presença de grandes canais preferenciais.

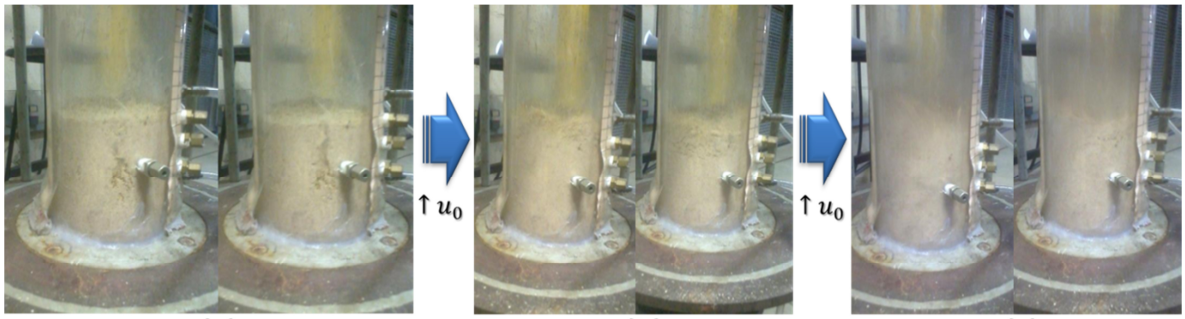


Figura 4.20. Imagens do leito contendo a mistura binária 92,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 7,5% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).

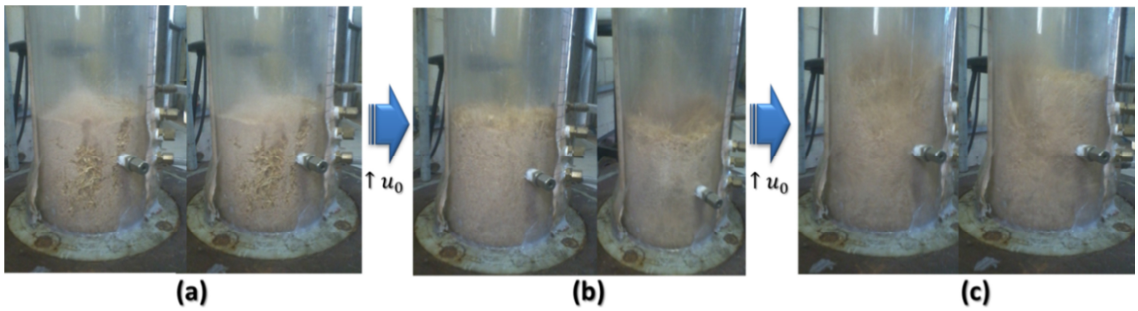


Figura 4.21. Imagens do leito contendo a mistura binária 90% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 10% de bambu *in natura* (*H/D* = 1).

A Figura 4.22 apresenta as curvas fluidodinâmicas obtidas para os leitos contendo 2,5%, 5%, 7,5% e 10% (em massa) de bambu *in natura* e areia no leito, usando a areia 3 e *H/D* igual a 1. Apenas um dos testes de cada mistura foi mostrado para permitir uma melhor visualização das diferenças observadas.

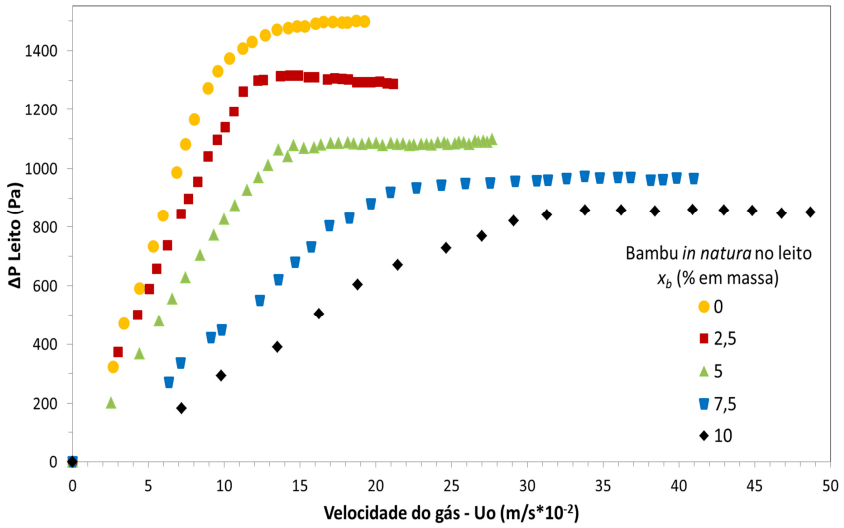


Figura 4.22. Curvas fluidodinâmicas para diferentes composições do leito em misturas binárias contendo a areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e bambu *in natura*.

A Tabela 4.5 apresenta os valores médios da massa da mistura e das U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} obtidas nos testes com diferentes composições de areia-bambu *in natura* no leito contendo a areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e *H/D* = 1.

Tabela 4.5. Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para diferentes composições do leito em misturas areia 3-bambu *in natura* ($\overline{dp}$ = 460 μm, *H/D* = 1).

x_b (%)	Massa do leito (10^{-3} kg)	U_{fi} (10^{-2} m/s)	U_{mf} (10^{-2} m/s)	U_{fc} (10^{-2} m/s)
0	1197 ± 26	-	10,7 ± 0,5	-
2,5	1006 ± 19	10,4 ± 0,6	11,5 ± 0,5	16,6 ± 0,4
5	867 ± 24	10,6 ± 0,7	13,3 ± 1,1	17,5 ± 0,5
7,5	762 ± 26	18,0 ± 0,4	20,3 ± 1,5	31,7 ± 0,8
10	680 ± 27	23,4 ± 3,1	29,4 ± 5,4	63,4 ± 1,1

A verificação da influência da composição do leito na fluidização de misturas binárias areia-carvão também foi realizada utilizando a areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) como material inerte, pois foi a areia que apresentou a melhor qualidade de fluidização conforme discutido no item 4.2. As composições estudadas foram 2,5%, 5%, 7,5% e 10% (em massa) de carvão no leito, conforme descrito no capitulo 3.

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 97,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 2,5% de carvão, verificou-se a mistura efetiva entre os dois componentes. Apenas para as maiores velocidades superficiais do gás testadas, a segregação do leito ocorreu rapidamente à medida que U_o era reduzida. A Fig. 4.23 mostra duas fotografias tiradas do leito para três condições operacionais diferentes, onde a condição de melhor mistura entre os componentes ocorreu para o maior valor de U_o (Fig. 4.23c). A segregação ocorreu com a redução da U_o, com acúmulo de partículas de carvão no topo do leito (Fig. 4.23b e 4.23a).

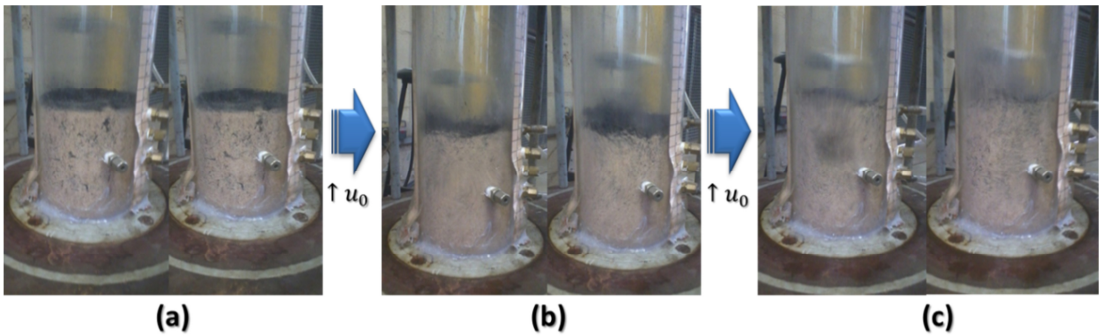


Figura 4.23. Imagens do leito contendo a mistura binária 97,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 2,5% de carvão (*H/D* = 1).

Comportamento semelhante ao descrito anteriormente também foi observado no teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de carvão. A Fig. 4.24 mostra duas fotografias tiradas do leito para três condições operacionais diferentes. A condição de melhor mistura entre os componentes ocorre para o maior valor de U_o (Fig. 4.24c). A segregação ocorreu claramente com a redução da U_o, com acúmulo de partículas de carvão no topo do leito (Fig. 4.24b e 4.24a).

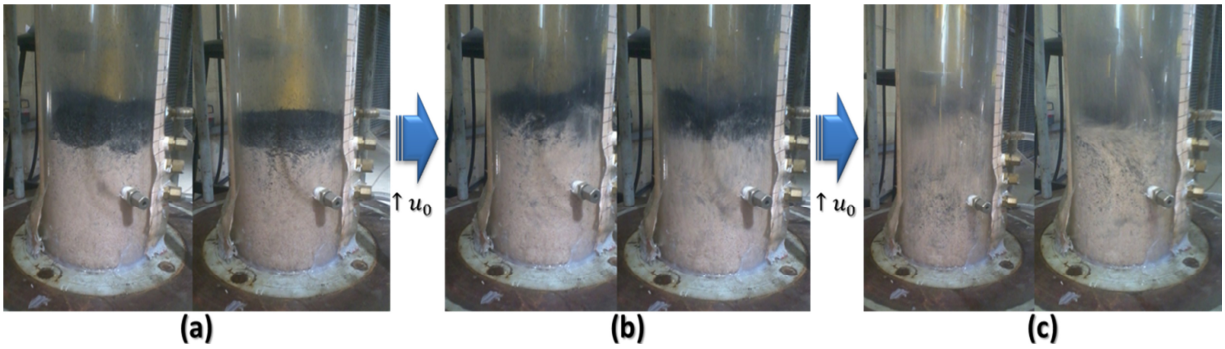


Figura 4.24. Imagens do leito contendo a mistura binária 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 µm) e 5% de carvão (*H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 92,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 7,5% de carvão também verificou-se forte tendência à segregação além da presença de bolhas grandes no leito para as maiores U_o testadas. A Fig. 4.25 mostra duas fotografias tiradas do leito para três condições operacionais diferentes. A mistura do leito é somente visível no regime de fluidização borbulhante (Fig. 4.25c). A segregação ocorre rapidamente com a redução da U_o, com acúmulo de uma grande quantidade de partículas de carvão no topo do leito (Fig. 4.25b e 4.25a).

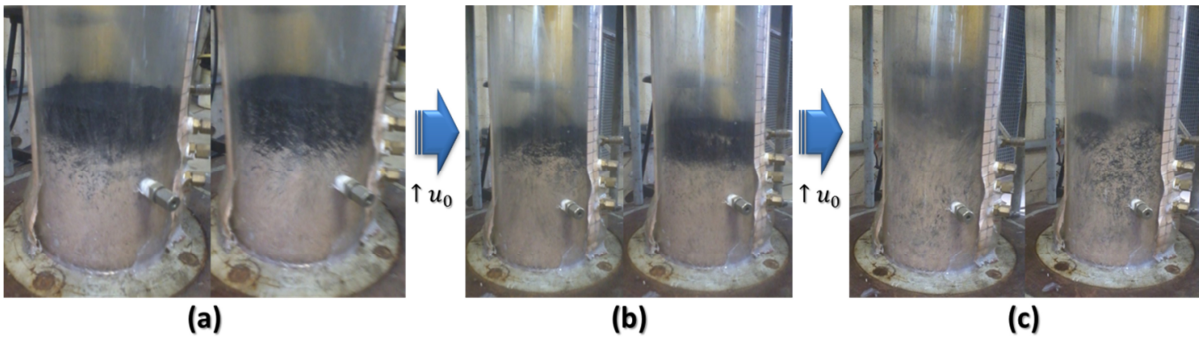


Figura 4.25. Imagens do leito contendo a mistura binária 92,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460µm) e 7,5% de carvão (*H/D* = 1).

No teste fluidodinâmico para a mistura binária contendo 90% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 10% de carvão verificou-se grande dificuldade para obter uma fluidização de boa qualidade. A Fig. 4.26 mostra duas fotografias tiradas do leito para três condições operacionais diferentes. A tendência à segregação foi muito alta para esta composição do leito. Mesmo no regime de fluidização borbulhante (Fig. 4.26c) não se verificou a mistura efetiva entre os componentes. A segregação ocorreu rapidamente com a redução da U_o, com acúmulo de uma grande quantidade de partículas de carvão no topo do leito (Fig. 4.26b e 4.26a).

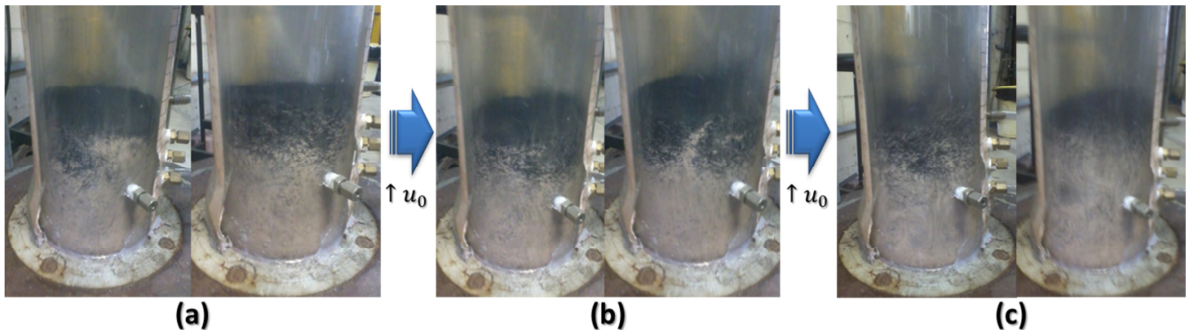


Figura 4.26. Imagens do leito contendo a mistura binária 90% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 10% de carvão (*H/D* = 1).

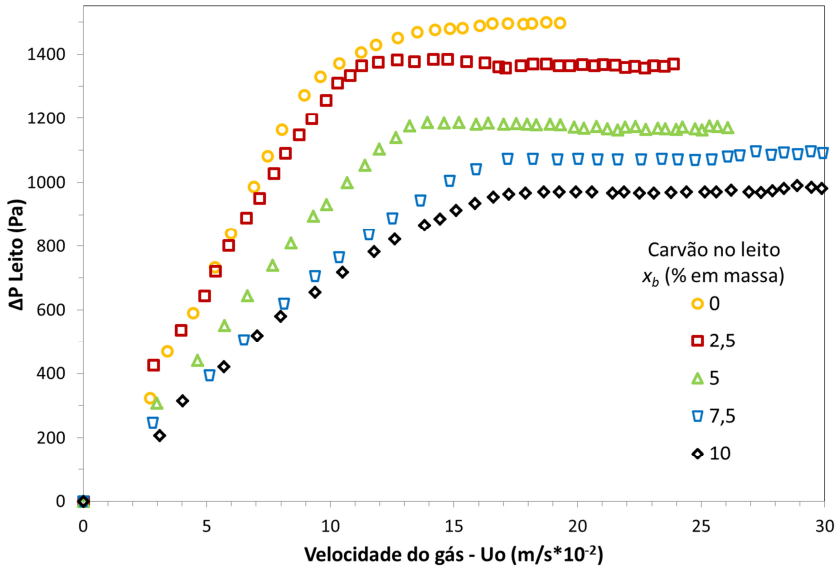


Figura 4.27. Curvas fluidodinâmicas para diferentes composições do leito em misturas binárias areia-carvão.

A Figura 4.27 apresenta as curvas fluidodinâmicas obtidas para os leitos contendo 2,5%, 5%, 7,5% e 10% (em massa) de carvão e areia no leito, usando a areia 3 e para *H/D* igual à unidade. Apenas um dos testes de cada mistura foi mostrado para permitir uma melhor visualização das diferenças observadas. A Tab. 4.6 apresenta os valores médios da massa da mistura e das U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} obtidas nos testes com diferentes composições de areia-carvão no leito, areia 3 ($\overline{dp} = 460\ \mu m$) e *H/D* = 1.

Tabela 4.6. Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para diferentes composições do leito em misturas areia 3-carvão ($\overline{dp} = 460\ \mu m$, *H/D* = 1).

x_b (%)	Massa do leito (10^{-3} kg)	U_{fi} (10^{-2} m/s)	U_{mf} (10^{-2} m/s)	U_{fc} (10^{-2} m/s)
0	1197 ± 26	-	10,7 ± 0,5	-
2,5	1037 ± 14	9,1 ± 0,3	10,3 ± 0,4	18,3 ± 0,7
5	914 ± 12	9,7 ± 1,2	11,9 ± 0,6	20,7 ± 0,7
7,5	818 ± 11	12,2 ± 0,5	16,0 ± 1,2	26,9 ± 0,9
10	739 ± 10	10,2 ± 0,9	14,6 ± 0,9	30,5 ± 1,4

A Figura 4.28 apresenta os pontos experimentais obtidos bem como as linhas de tendência do comportamento das velocidades da fluidização em função da porcentagem de biomassa no leito para as misturas binárias areia-bambu *in natura* (Fig. 4.28a) e areia-carvão (Fig. 4.28b), com areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e *H/D* = 1. Como descrito por diferentes pesquisadores na revisão da literatura (capitulo 2), maiores quantidades de biomassa no leito produzem maiores velocidades de fluidização (ROWE; NIENOW, 1976; FORMISANI; GIRIMONTE; LONGO, 2008; ZHANG; JIN; ZHONG, 2009). No caso das misturas binárias considera-se que a fluidização completa do leito ocorre quando a velocidade superficial do gás atinge U_{fc} (TANNOUS; HEMATI; LANQUERIE, 1998).

Verificou-se que para teores de biomassa no leito superiores a 5 %, ocorre o acúmulo do componente *flotsam* (bambu *in natura* e carvão) na superfície do leito, fenômeno que pode ser observado nas Figs. 4.20 e 4.21 (bambu *in natura*) e Figs. 4.25 e 4.26 (carvão), alterando fortemente o comportamento fluidodinâmico do leito levando ao aparecimento de canais preferenciais (no caso da mistura areia-bambu *in natura*) e aglomeração das partículas de biomassa.

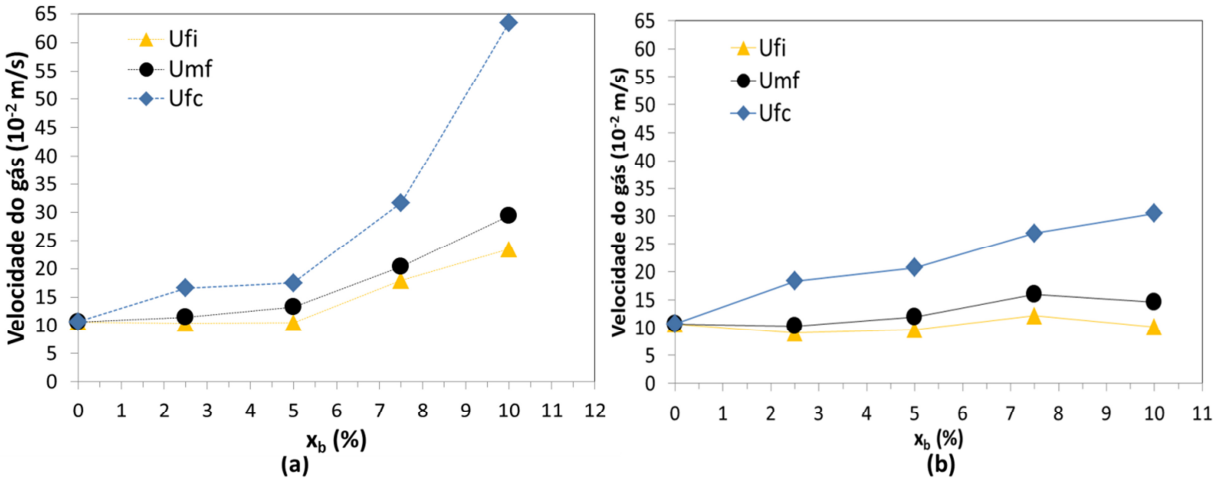


Figura 4.28. Velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} em função da porcentagem da biomassa no leito em misturas binárias (a) areia-bambu *in natura* e (b) areia-carvão, areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e *H/D* = 1.

O aumento do porcentual do bambu *in natura* na mistura de 2,5 para 10% gerou aumento

de 56% da U_{fi}, 61% da U_{mf} e 74% da U_{fc}. Nos testes utilizando o carvão de bambu, o aumento de 2,5 para 10% de carvão no leito, provocou aumentos bem menores nessas velocidades (11% para U_{fi}, 29% para U_{mf} e 40% para U_{fc}). Nos resultados descritos por Zhang, Jin e Zhong (2009) a partir de estudos em leitos contendo haste de algodão e areia, o aumento da porcentagem da biomassa de 1 para 3% provocou o surgimento de segregação no leito, diminuição de 9% da U_{fi} e aumento de 3% no valor da U_{mf} e 7% da U_{fc}. Rao e Bheemarasetti (2001) relataram aumento da U_{mf} contendo diferentes misturas biomassa-areia com o aumento do porcentual da biomassa de 2 para 15% tendo sido observado o aumento de 122% para casca de arroz, 40% para serragem de madeira e 62% para casca de amendoim em pó.

Considerando a mistura contendo até 5% de biomassa em sua composição, o intervalo de velocidades onde o fenômeno da segregação ocorre (U_{fc} - U_{fi}) é maior em leitos contendo carvão de bambu em relação a leitos contendo bambu *in natura*, como se observa na Fig. 4.28 em testes utilizando a areia 3 como material inerte. Entretanto, para 10% de bambu *in natura* no leito, o valor da U_{fc} foi 108% maior que o valor da U_{fc} da mistura contendo 10 % de carvão de bambu. Verifica-se ainda que, nessa composição, o intervalo de velocidades (U_{fc} - U_{fi}) obtido para a mistura contendo bambu *in natura* é aproximadamente o dobro do valor obtido para a mistura que possui carvão de bambu em sua composição. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que, para concentrações acima de 5% de bambu *in natura* no leito, ocorre um forte entrelaçamento entre as partículas, o que favorece a formação de aglomerados em diferentes regiões do leito, necessitando de maiores velocidades de gás para gerar uma boa mistura entre os componentes. A formação desses aglomerados é mais evidente no leito contendo partículas de bambu *in natura* que no leito contendo carvão de bambu devido ao próprio formato das partículas.

A Tabela 4.7 apresenta a comparação entre os valores obtidos de U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para as misturas contendo areia 3-bambu *in natura* e areia 3-carvão de bambu, junto ao valor obtido de U_{mf} do leito contendo apenas areia. Visando verificar o efeito do tratamento térmico sobre a fluidização de misturas contendo partículas de bambu.

Tabela 4.7. Comparação entre os valores obtidos de U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} para as misturas contendo bambu *in natura*-areia 3 e carvão de bambu-areia 3.

Composição (%)	Biomassa na mistura	U_{fi} (m/s)	ΔU_{fi}* (%)	U_{mf} (m/s)	ΔU_{mf}* (%)	ΔU_{mf}** (%)	U_{fc} (m/s)	ΔU_{fc}* (%)
0	-	-	-	10,7	-	-	-	-
2,5	Bambu *in natura*	10,4	-13	11,5	-10	7	16,6	10
	Carvão de bambu	9,1		10,3		-4	18,3	
5	Bambu *in natura*	10,6	-9	13,3	-11	20	17,5	18
	Carvão de bambu	9,7		11,9		10	20,7	
7,5	Bambu *in natura*	18	-32	20,3	-21	47	31,7	-15
	Carvão de bambu	12,2		16,0		33	26,9	
10	Bambu *in natura*	23,4	-56	29,4	-50	64	63,4	-52
	Carvão de bambu	10,2		14,6		27	30,5	

$*\Delta U = \left(\frac{U_{\text{bambu } in\ natura} - U_{\text{carvão}}}{U_{\text{bambu } in\ natura}}\right) * 100$

$**\Delta U = \left(\frac{U_{\text{mistura}} - U_{areia}}{U_{areia}}\right) * 100$

Comparando as velocidades de mínima fluidização obtidas para as misturas testadas com a velocidade mínima fluidização obtida com o leito contendo apenas areia 3, verifica-se um aumento de 7 a 64 % para as misturas areia 3-bambu *in natura* e uma variação de -4 a 33% para as misturas areia 3-carvão de bambu. Considerando apenas as misturas contendo 5% de biomassa, essa diferença é de 10 e 20 % para as misturas areia 3-carvão de bambu e areia 3-bambu *in natura,* respectivamente. Pode-se verificar que o tratamento térmico provocou a redução das velocidades U_{fi} e U_{mf} de 9 a 13 % e o aumento de U_{fc} de 10 a 18 %, considerando teores de biomassa de até 5% no leito. Para as composições de biomassa superiores a 5% os valores das velocidades de fluidização para as misturas contendo carvão foram entre 15 e 56% menores do que as obtidas para as misturas contendo o bambu *in natura*. Para 10% de biomassa no leito, essa

redução esteve entre 50 e 56%.

Os resultados mostrados na Tab. 4.7 indicam que a utilização da U_{mf} do material inerte para o projeto de reatores de pirólise, utilizando partículas de bambu como combustível, não é recomendável, uma vez que a presença de apenas 5 % (em massa) de bambu *in natura* aumenta o valor da U_{mf} em 24 %; enquanto que esse aumento é de 11 % no leito contendo carvão de bambu. Esses resultados mostram a necessidade de testes experimentais para a escolha da U_{mf} mais adequada para o projeto de reatores que operam com misturas de areia e partículas de bambu. Caso a realização de experimentos não seja possível, recomenda-se a utilização de um fator de correção entre 1,1 e 1,3 sobre a *Umf* da areia.

A Figura 4.29 apresenta os pontos experimentais bem como as linhas de tendência observadas para a influência da composição da mistura sobre a razão entre as velocidades de mínima fluidização e de fluidização completa para as misturas areia 3-bambu (Fig. 4.29a) e areia 3-carvão (Fig. 4.29b). Quando U_{mf}/U_{fc} aproxima-se do valor unitário verifica-se que o leito apresenta uma boa qualidade da fluidização, assim, esta relação é também uma indicação do grau de segregação (CHOK; GORIN; CHUA, 2010). Pode-se observar que no caso das misturas areia 3-bambu maiores afastamentos do valor unitário ocorrem para concentrações de biomassa superiores a 5%, indicando ser esse o teor máximo recomendado de bambu *in natura* no leito, para assegurar-se uma mistura efetiva entre os componentes da mistura. No caso das misturas areia 3-carvão verifica-se que concentrações de até 7,5 % apresentam qualidade de fluidização semelhantes, no entanto, aparentemente, uma areia mais fina do que a areia testada forneceria valores da razão U_{mf}/U_{fc} mais próximos da unidade, o que indicaria uma melhor qualidade de fluidização da mistura. Circunstancia que pode ser atribuída à redução na relação de densidades $\rho_{carvão}/\rho_{areia}$, como foi descrito por Rowe e Nienow (1976), que consideraram um fator mais importante do que a diferença de tamanhos na determinação do grau de segregação da mistura. Assim, a alta concentração de carvão na superfície do leito para os leitos compostos pela areia 3 pode estar relacionada à diferença de densidades entre o carvão e a areia 3, cuja relação é de 0,36, sendo mais baixa que a relação de densidades do bambu *in natura* e a areia que é de 0,52. Embora a razão entre os tamanhos dos componentes da mistura seja mais próxima à unidade no caso das misturas areia 3-carvão ($dp_{biomassa}/dp_{areia}$ = 1,14) do que para as misturas areia 3-bambu

in natura ($dp_{biomassa}/dp_{areia}$ = 1,8).

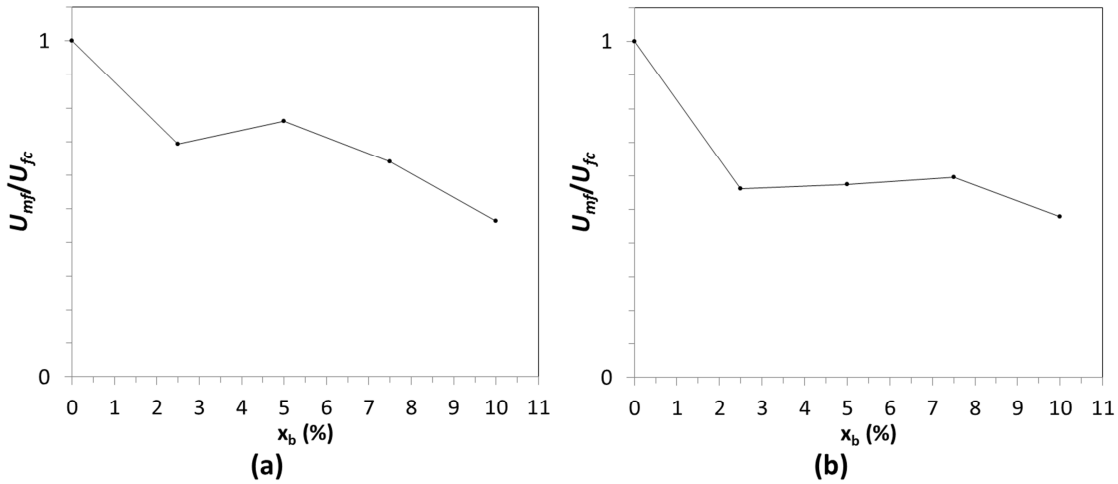


Figura 4.29. Relação de velocidades U_{mf}/U_{fc} em função do percentual da biomassa em misturas (a) areia-bambu *in natura* e (b) areia-carvão.

Os formatos de cilindro alongado das partículas de bambu *in natura* favorecem o aparecimento de canais preferenciais a partir das concentrações maiores que 5%. Efeito que não foi observado nas misturas areia-carvão. Fato que pode se atribuir à redução de 36% do tamanho (Figs. 4.2 e 4.3) e 31% na densidade aparente (Tab. 4.1) do bambu devido ao processo de pirólise a 500 °C por 1 hora.

4.5. Comparação dos dados experimentais com as correlações da literatura

Nesta Seção foram comparados os valores de U_{mf} obtidos experimentalmente para as misturas bambu-areia e carvão-areia com os valores estimados a partir das correlações descritas na Tab. 2.1, a qual destaca algumas correlações obtidas a partir de experimentos envolvendo biomassas nas condições operacionais descritas.

A Figura 4.30 apresenta as velocidades de mínima fluidização obtidas experimentalmente para as misturas bambu *in natura*-areia 3 (*H/D* = 1) em função do diâmetro da areia,

conjuntamente com os resultados obtidos usando as correlações apresentadas na Tab. 2.1. A Tab. 4.8 apresenta os desvios entre os valores da U_{mf} experimental e a U_{mf} obtida a partir das correlações da Tab. 2.1 para as misturas contendo bambu *in natura*-areia 3 (H/D = 1) em função do diâmetro da areia. Os cálculos foram realizados com a correção da esfericidade experimental no diâmetro do material.

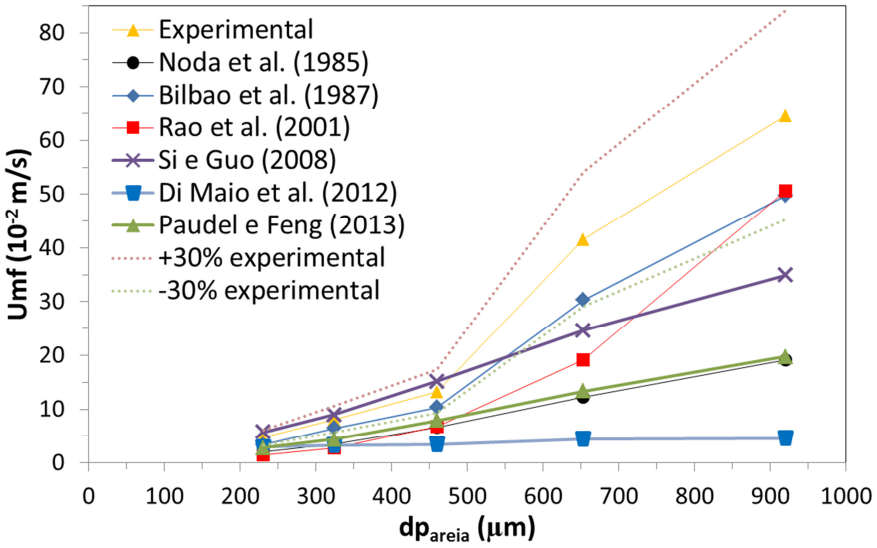


Figura 4.30. U_{mf} para as misturas binárias contendo 95% de areia e 5% de bambu *in natura* em função do dp_{areia} – comparação com resultados previstos por correlações da literatura.

Tabela 4.8. Desvios entre os valores da U_{mf} experimental e a U_{mf} obtida a partir das correlações indicadas na Tab. 2.1 para as misturas binárias contendo 95% de areia e 5% de bambu *in natura* em função do dp_{areia}.

Correlação	**Misturas contendo bambu *in natura* e**				
	Areia 1	**Areia 2**	**Areia 3**	**Areia 4**	**Areia5**
	$\Delta U_{mf} = \frac{\lvert U_{mf} - U_{mf,correlação} \rvert}{U_{mf}} * 100\ (\%)$				
Noda *et al.* (1986)	57	58	51	71	70
Bilbao, Lezaun e Abanades (1987)	29	21	22	27	23
Rao e Bheemarasetti (2001)	70	66	49	54	22
Si e Guo (2008)	22	11	14	41	46
Di Maio, Di Renzo e Vivacqua (2012)	38	60	74	89	93
Paudel e Feng (2013)	41	47	41	68	69

Verifica-se que para as misturas contendo bambu *in natura*-areia, em geral os maiores afastamentos entre os resultados experimentais e os previstos por correlações da literatura ocorrem à medida que aumenta o valor do diâmetro do material inerte (dp_{areia}), fato também observado por Rao e Bheemarasetti (2001). Os valores estimados para as cinco U_{mf}, obtidas nos testes fluidodinâmicos operando com cinco tamanhos de areia diferentes, em comparação com os resultados obtidos a partir da correlação de Bilbao *et al.* (1987), apresentam desvios variando entre 21 e 29%. Os valores estimados para as U_{mf} das misturas contendo as areias 1, 2 e 3 ($\overline{d_p}$ = 231, 324 e 460 μm) com as correlações de Si e Guo (2008) apresentam desvios entre 11 e 22%. Para a mistura contendo a areia 4 ($\overline{d_p}$ = 653 μm) e bambu *in natura,* todas as correlações, exceto as correlações de Bilbao, Lezaun e Abanades (1987); apresentaram afastamentos entre 41 e 89 %. Para a mistura contendo a areia 5, somente as correlações de Bilbao *et al.* (1987) e Rao e Bheemarasetti (2001) apresentaram desvio entre 22 e 23 %; para as demais correlações, os desvios estiveram entre 46 e 93 %. Esses resultados sugerem que, para concentrações de até 5 % de partículas de bambu no leito, as correlações de Bilbao *et al.* (1987) e Si e Guo (2008) são as mais adequadas para prever a velocidade de mínima fluidização da mistura.

A Figura 4.31 apresenta as U_{mf} obtidas experimentalmente para as misturas bambu *in natura*-areia 3 (*H/D* = 1) em função da composição de biomassa na mistura, conjuntamente com os resultados obtidos usando as correlações apresentadas na Tab. 2.1. A Tab. 4.9 apresenta os desvios entre os valores da U_{mf} experimental e a U_{mf} obtida a partir das correlações da Tab. 2.1 para as misturas contendo bambu *in natura*-areia 3. Os cálculos foram realizados com a correção da esfericidade experimental no diâmetro do material.

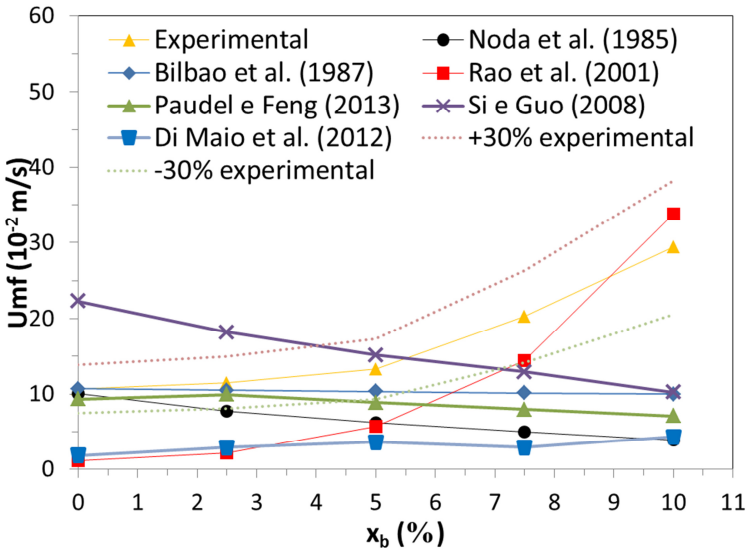


Figura 4.31. U_{mf} para diferentes composições do leito em misturas bambu *in natura*-areia 3 e os resultados previstos por correlações da literatura.

Tabela 4.9. Desvios entre os valores da U_{mf} experimental e a U_{mf} obtida a partir das correlações indicadas na Tab. 2.1 para as misturas contendo bambu *in natura*-areia 3 e carvão de bambu-areia 3.

Correlação	**Biomassa na mistura**	x_b **= 2,5%**	x_b **= 5%**	x_b **= 7,5%**	x_b **= 10%**
		$\Delta U_{mf} = \frac{\lvert U_{mf} - U_{mf,correlação} \rvert}{U_{mf}} * 100\ (\%)$			
Noda et al. (1985)	Bambu *in natura*	33	54	75	87
	Carvão de bambu	40	63	80	84
Bilbao, Lezaun e Abanades (1987)	Bambu *in natura*	9	22	50	66
	Carvão de bambu	0,6	15	39	35
Rao e Bheemarasetti (2001)	Bambu *in natura*	82	58	29	15
	Carvão de bambu	31	43	59	60
Si e Guo (2008)	Bambu *in natura*	58	14	36	65
	Carvão de bambu	42	9	49	58
Di Maio, Di Renzo e Vivacqua (2012)	Bambu *in natura*	75	73	86	85
	Carvão de bambu	83	84	91	86
Paudel e Feng (2013)	Bambu *in natura*	14	33	61	76
	Carvão de bambu	20	45	67	73

Verifica-se, em geral, que maiores afastamentos entre os resultados experimentais e os

previstos por correlações da literatura ocorrem à medida que aumenta o teor de biomassa no leito (x_b), fato também observado por Rao e Bheemarasetti (2001). Os valores estimados para as U_{mf} das misturas contendo 2,5 e 5 % (em massa) de bambu *in natura* com as correlações de Bilbao, Lezaun e Abanades (1987) apresentaram desvios entre 9 e 22%, sendo esta a correlação que forneceu resultados mais próximos aos experimentais. Os valores estimados para as U_{mf} das misturas contendo 7,5 e 10 % (em peso) de bambu *in natura* com as correlações de Rao e Bheemarasetti (2001) apresentaram desvios entre 29 e 15%. Para os valores da U_{mf} com a mistura contendo 10% de bambu *in natura*, as correlações de Noda *et al.* (1985), Bilbao, Lezaun e Abanades (1987); Paudel e Feng (2013), Si e Guo (2008) e Di Maio, Di Renzo e Vivacqua (2012) apresentaram afastamentos entre 65 e 87%, indicando que não são correlações adequadas para a estimativa de U_{mf}.

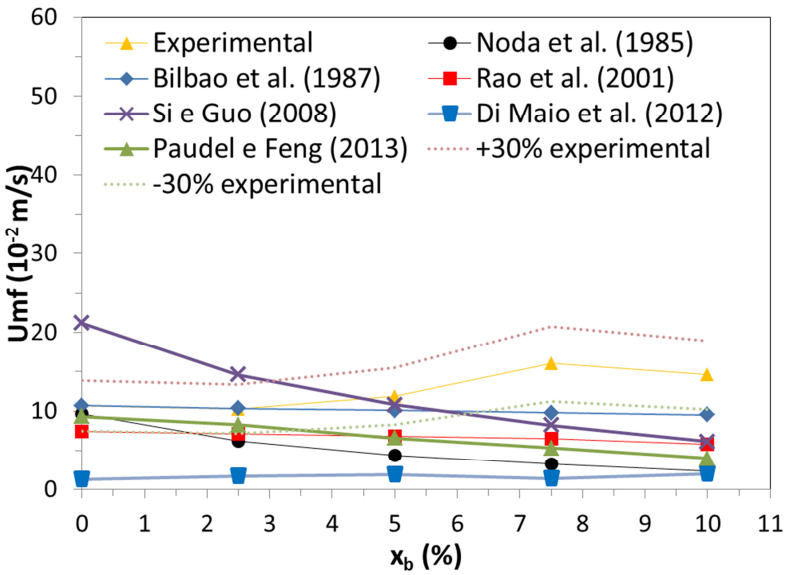


Figura 4.32. U_{mf} para diferentes composições do leito em misturas carvão-areia 3 e os resultados previstos por correlações da literatura.

A Figura 4.32 apresenta as U_{mf} obtidas experimentalmente para as misturas carvão-areia 3 (H/D = 1) em função da composição de biomassa na mistura, conjuntamente com os resultados obtidos usando as correlações apresentadas na Tab. 2.1. A Tab. 4.9 apresenta os desvios entre os

valores da U_{mf} experimental e a U_{mf} obtida a partir das correlações da Tab. 2.1 para as misturas contendo carvão de bambu-areia 3. Os cálculos foram realizados com a correção da esfericidade experimental no diâmetro do material.

Novamente os resultados mostraram ocorre maior afastamento entre os resultados experimentais e os previstos por correlações da literatura à medida que aumenta o teor de biomassa no leito. Os valores estimados para as U_{mf} das quatro misturas carvão-areia 3 testadas de carvão com as correlações de Bilbao, Lezaun e Abanades (1987) apresentam desvios entre 0,6 e 39%. Os valores estimados para as U_{mf} das misturas contendo 2,5 % (em massa) de carvão com as correlações de Noda *et al.* (1985), Si e Guo (2008), Rao e Bheemarasetti (2001) e Paudel e Feng (2013) apresentaram desvios entre 20 e 42%. Os maiores desvios entre os valores estimados para U_{mf} pelas correlações testadas, em relação aos valores obtidos experimentalmente, estiveram, para a concentração de 10 % de biomassa no leito, entre 35 e 86%.

Acredita-se que o baixo valor da esfericidade da biomassa influenciou consideravelmente os resultados fornecidos pelas correlações, especialmente para as misturas contendo 7,5 e 10 % (em peso) de biomassa no leito.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados obtidos para as velocidades U_{fi}, U_{mf} e U_{fc}, assim como a tendência do comportamento fluidodinâmico ΔP_L vs U_o das misturas bambu-areia, são coerentes e estão de acordo com o exposto por diferentes pesquisadores segundo a revisão da literatura mostrada no capítulo 2.1.

A avaliação da influência do tamanho da areia nas misturas testadas de bambu *in natura* e areia determinou o tamanho de areia mais adequado para obter a melhor qualidade da fluidização, identificada com a areia 3, com diâmetro médio de 460 μm.

A avaliação da influência da vazão *H/D* na qualidade da fluidização com a variação da altura estática do leito determinou que a altura de 0,10 *m*, razão *H/D* igual à unidade, foi a mistura que apresentou melhor qualidade de fluidização.

A avaliação da influência da composição de biomassa no leito permitiu verificar que 5 % (em massa) corresponde ao porcentual máximo de biomassa nas misturas areia-bambu *in natura* que permite uma combinação adequada entre qualidade da fluidização e menor faixa onde a segregação do leito ocorre. Também foi verificado que a areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) não é a mais adequada para assegurar-se uma boa qualidade de fluidização das misturas areia-carvão de bambu estudadas.

Os resultados obtidos utilizando misturas contendo areia 3 indicam que a utilização da U_{mf} do material inerte para o projeto de reatores de pirólise, utilizando partículas de bambu como combustível, não é recomendável, uma vez que diferenças entre $U_{mf,areia}$ e $U_{mf,mistura}$ variaram entre 11 e 24% nos testes realizados. Logo, recomenda-se a utilização de um fator de correção entre 1,1 e 1,3 sobre a U_{mf} da areia, ou a realização de testes experimentais para levantamento da curva fluidodinâmica do material do leito contido no reator.

A aplicação das correlações de Bilbao, Lezaun e Abanades (1987) apresentaram estimativas de U_{mf} mais próximas aos valores obtidos experimentalmente para misturas biomassa-areia contendo bambu *in natura* e carvão de bambu, indicando que poderiam ser aplicadas para esses materiais considerando tamanhos de areia de até 653 μm e valores de x_b até 5% (em massa). A correlação de Rao e Bheemarasetti (2001) foi a única, dentre as testadas, que apresentou

resultados próximos aos experimentais obtidos para misturas contendo a areia mais grossa ($\overline{dp}$ = 920 μm) e porcentual de biomassa considerando valores de x_b de 10%. Os resultados obtidos mostram que ainda há necessidade de pesquisas nesta área.

Como sugestões para trabalhos futuros, os seguintes itens podem ser listados:

- Estender a análise da influência do material inerte nas misturas contendo carvão-areia;
- Estudar o fenômeno da segregação nas misturas bambu-areia usando a análise da variação da porosidade do leito ao longo da altura do leito.
- Avaliar estatisticamente possíveis influências na combinação do tamanho da areia, altura do leito e composição da mistura sobre a fluidodinâmica das misturas binárias bambu-areia.
- Desenvolver modelos matemáticos que representem o comportamento da velocidade de fluidização para as misturas bambu-areia seriam um padrão útil para o projeto de reatores.
- Estudar o efeito do tamanho das partículas de bambu sobre a fluidodinâmica do leito.
- Caracterizar e comparar o comportamento fluidodinâmico de diferentes espécies de bambu visando identificar suas potenciais aplicações industriais em combustão, gaseificação e pirolise.
- Estudar a fluidodinâmica das misturas estudadas, em leitos fluidizados pulsantes, vibratórios ou pulso-fluidizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇIKALIN, K.; KARACA, F.; BOLAT, E. **Pyrolysis of pistachio shell: Effects of pyrolysis conditions and analysis of products.** Fuel, v. 95, p. 169–177, 2012.

ASADA, C.; NAKAMURA, Y.; KOBAYASHI, F. **Waste reduction system for production of useful materials from un-utilized bamboo using steam explosion followed by various conversion methods.** Biochemical Engineering Journal, v. 23, p. 131-137, 2005.

ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS E1757-01. **Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis.** ASTM International , 2007.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2006.

BILBAO, R.; LEZAUN, J.; ABANADES, J. C. **Fluidization Velocities of Sand/Straw Binary Mixtures.** Powder Technology, v. 52, p. 1-6, 1987.

BEECKMANS, J.M.; STAHL, B. **Mixing and Segregation Kinetics in a Strongly Segregated Gas-Fluidized Bed.** Powder Technology, v. 53, p. 31- 38, 1987.

BRIDGWATER, A.; MEIER, D. e RADLEIN, D. **An overview of fast pyrolysis of biomass.** Organic Geochemistry, v. 30, n. 12, p. 1479–1493, 1999.

CAMARGO, F. L. **Estudo da Pirólise Rápida de Bagaço de Cana em Reator de Leito Fluidizado Borbulhante.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

CÁRDENAS-FONSECA, O. L. **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2009.

CHOK, V. S.; GORIN, A.; CHUA, H. B. **Minimum and Complete Fluidization** Velocity for Sand-Palm Shell Mixtures, part I: Fluidization Behavior and Characteristic Velocities. American Journal of Applied Sciences, v.7, p. 763-772, 2010.

CHYANG, C.; KUO, C.; CHEN, M. **Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixtures.** The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 67, p. 344-347, 1989.

Corporación de Investigación Tecnológica de Chile. **Bambú en Chile**. Santiago. 2003

CORTEZ, L. A. B.; SILVA LORA, E. E.; OLIVARES GOMEZ, E. **Biomassa para energia**. Editora da Unicamp, Campinas, São Paulo, Brasil, 2008.

DAZA, C. M.; CAMARGO, J.; LONDOÑO, X.; DIAZ-CHÁVEZ, R.; VERHEGGEN, B.; FRYDA, L. **Bamboo as an Alternative Sustainable Fuel. A Life Cycle Assessment.** 21st European Biomass Conference and Exhibition, 2013.

DI MAIO, F. P.; DI RENZO, A.; VIVACQUA, V. **A Particle Segregation Model for Gas-Fluidization of Binary Mixtures.** Powder Technology, v. 226, p. 180-188, 2012.

FIALHO, E. G.; TONHOLO, J.; DA SILVA, A. L. P. **Desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu: Uma oportunidade para empreender.** XI Seminário Latino-Americano de Gestión Tecnológica, Altec 2005, Salvador, Brasil, 2005.

FORMISANI, B; DE CRISTOFARO, G.; GIRIMONTE, R. **A fundamental approach to the**

phenomenology of fluidization of size segregating binary mixtures of solids. Chemical Engineering Science, v. 56, p. 109-119, 2001.

FORMISANI, B.; GIRIMONTE, R.; LONGO, T. **The fluidization process of binary mixtures of solids: Development of the approach based on the fluidization velocity interval.** Powder Technology, v. 185, p. 97-108, 2008.

FRANÇA SOARES, I. R. DE; SANTANA SILVA, F. M.; MOTA LINS, M. C.; FRITZ DE SOUZA, N. A.; THOMÉ JUCÁ, J. F.; **Avaliação do potencial de geração de biogás do bambu residual proveniente de indústria de papel e celulose.** II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários de Agroindustrias, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2001.

FRYDA, L.; DAZA, C.; PELS, J.; JANSSEN, A.; ZWART, R. **Lab-scale co-firing of virgin and torrefied bamboo species *Guadua angustifolia Kunth* as a fuel substitute in coal fired power plants.** Biomass and Bioenergy, v. 56, p. 28-41, 2014.

GANESAN, T. E LINGAPPAN, S. **A Survey on Circulating Fluidized Bed Combustion Boilers.** International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Insrumentation Engineering - IJAREEIE, v. 2, p. 4032-4042, 2013.

GELDART, D. **Gas Fluidization Technology.** John Wiley and Sons. Great Britain, 1986.

GELPERIN, N. I.; EINSTEIN, V. G.; NOSOV, G. A.; MAMOSHKINA, V. V.; REBROVA, S. K., Fluidization Features of Binary Mixtures of Granulated Material, **Thor. Osnovy Khim. Techol**. v. 1, p.383, 1967, apud CHYANG, C.; KUO, C.; CHEN, M., Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixtures, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 67, p.344-347, 1989.

GYENIS, J. **Assessment of mixing mechanism on the basis of concentration pattern.** Chemical Engineering and Processing, v. 38, p. 665–674, 1999.

GIBILARO, L. G.; ROWE, P. N. **A Model for a Segregating Gas Fluidized Bed**, Chemical Engineering Science, v. 29, p. 1403-1412, 1974.

GUARNETTI, L. R. **Estudo da sustentabilidade ambiental do cultivo comercial do bambu gigante: Produção de colmos e brotos.** Dissertação de Mestrado, Engenharia de Produção e Meio Ambiente, Universidade Paulista (UNIP), 2007.

GUO, Q.; WERTHER, J.; AUE-KLETT, C.; HARTGE, E. Flow **Maldistribution at Bubble Cap Distributor in a Plant-Scale Circulating Fluidized Bed Riser.** AIChe Journal, v. 51, p. 1359-1366, 2005.

INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (IEE-USP). **Resíduos rurais: Tratamento adequado pode gerar energia e renda.** Revista brasileira de Bioenergia, Ano 6, n. 14, São Paulo, Brasil, 2012.

KALHER, C. G**. Report on bamboo thematic study in the framework of Forest Resources Assessment Program 2005 for Latin America.** Global forest resources assessment, working paper 123, 2005.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1991.

LI, Z.; KOBAYASHI, N.; NISHIMURA, A.; HASATANI, M. **A Method to Predict the Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixtures Based on Particle Packing Properties**. Chemical Engineering Comm., v. 192, p. 918-932, 2005.

LONDOÑO, XIMENA. **Evaluation of bamboo resources in Latin America**. A Summary of

the Final Report of Project No. 96-8300-01-4, Internatinoal Network for Bamboo and Rattan, Cali, Colombia, 1998.

LORA, E.S.; ANDRADE, R.V. **Biomass as energy source in Brazil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, p. 777–788, 2009.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. **Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review.** Energy & Fuels, v. 20, p. 848-889, 2006.

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

OTERO A. R.; CORELLA, J. An. Soc. Esp. Fis. Quim. (Sp.), v. 67, p. 1207, 1971, apud REINA, J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. **Predicting the Minimum Fluidization Velocity of Polydisperse Mixtures of Scrap-Wood Particles.** Powder Technology, v. 111, p. 245–251, 2000.

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.

PEÇANHA, R. P.; MASSARANI, G. **Dimensão característica e forma de partículas.** In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 14, 1986, Campinas. Anais... Campinas, v. 1, p. 302-312, 1986.

PÉCORA, A. A. B.; HERNANDEZ-MENA, L. E.; NAKASHIMA, F. M.; RAMIREZ-QUINTERO, D. A.; GENARI, E. R. **Estudo da Velocidade de Mínima Fluidização para Misturas Binárias Biomassa-Areia.** XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, ENEMP 2013, Maceió, PB. Anais do ENEMP 2013. p. 1-10, 2013.

PELLEGRINI MANHÃES, A. **Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil: abordagem preliminar.** Monografia de graduação, Engenharia Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma.** Canal 6, projetos editoriais, p. 240. Bauru, São Paulo, Brasil, 2007.

POTENCIANO, N. M.; NISGOSKI, S.; KLOCK, U.; SULATO DE ANDRADE, A.; BOLZON DE MUÑIZ, G .I. **Análise química do bambu-gigante (*dendrocalamus giganteus wall. ex munro*) em diferentes idades.** Ciência Florestal, v. 22, n. 2, p. 417-422, 2012.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA DO BRASIL (PLANALTO). Casa Civil Subchefia para Assuntos Jurídicos, http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12484.htm.

PÜTÜN, A. E.; ONAL, E.; UZUN, B. B.; OZBAY, N. **Comparison between the "slow" and "fast" pyrolysis of tobacco residue.** Industrial Crops and Products, v. 26, p. 307–314, 2007.

RAJI, T.O.; OYEWOLA, O.M; SALAU, T.A.O. **New features for performance enhancement of experimental Model Bubbling Fluidized Bed Combustor.** International Journal of Scientific & Engineering Research, v. 3, issue 1, 2012.

RAMÓN MERCEDES, J. **Guía Técnica Cultivo del Bambú.** Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal, Inc. (CEDAF), Santo Domingo, República Dominicana, 2006.

RAO, T. R.; BHEEMARASETTI, J. V. R. **Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands.** Energy, v. 26, p. 633-644, 2001.

RASUL, M. G.; RUDOLPH, V. **Fluidized Bed Combustion of Australian Bagasse.** Fuel, v. 79, p. 123-130, 2000.

REDE BRASILEIRA DO BAMBU (RBB). **Anais do I Seminário Nacional do Bambu: Estruturação da rede de pesquisa e desenvolvimento. ancing the combustible properties of bamboo by torrefaction.** Bioresource Technology, v. 102, n. 17, p. 8225-8231, 2011.

ROWE, R. N.; NIENOW, A. W. **Particles mixing and segregation in gas fluidized beds.** Powder Technology, v. 15, p. 141-147, 1976.

RUEDA O, D. A. **Estudo experimental de segregação de partículas em misturas binárias usando análise de flutuações de pressão em leito fluidizado gás-sólido.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2014.

SCURLOCK, J. M. O. **Bamboo: an overlooked biomass resource?** Biomass and Bioenergy, v. 19, p. 229–244, 2000.

SUN, Z.-A.; JIN, B.-S.; ZHANG, M.-Y.; LIU, R.´P.; ZHANG, Y. **Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed**. Applied Energy, v. 85, p. 1027-1040, 2008.

TANNOUS, K.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. **Hydrodinamic characteristics of fluidized beds containing large polydispersed particles.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 15, p. 55-72,1998.

TANNOUS, K.; MIZONOV, V. **Comportamento da biomassa na fluidodinâmica em leitos fluidizados cônico e cilíndrico.** XXXIV Congresso brasileiro de sistemas particulados ENEMP 2009, Campinas, SP. Anais do ENEMP 2009. p. 1-10, 2009.

TAYLOR, JHON. **Na introduction to error analysis. Second edition. University Science Books, California, USA, 1982.**

TEIXEIRA, A. A. **Painéis de bambu para habitações econômicas: Avaliação do desempenho de painéis revestidos com argamassa.** Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Área de Tecnologia, Universidade de Brasília (UNB), Dissertação de Mestrado, 2006.

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, p. 223-239, 1984.

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

WU, S. Y.; BAEYENS, J. **Segregation by Size Difference in Gas Fluidized Beds.** Powder technology, v. 98, p. 139-150, 1998.

YANG, W. C. **Handbook of Fluidization and Fluid Particle Systems**. Pittsburgh: Marcel Dekker Inc., 2003.

ZHANG, Y.; JIN, B.; ZHONG, W. **Experimental Investigation on Mixing and Segregation Behavior of Biomass Particle in Fluidized Bed**. Chemical Engineering and Processing, v. 48, p. 745-754, 2009.

APÊNDICE A CÁLCULO DE VAZÃO POR MEIO DE PLACA DE ORIFÍCIO UTILIZANDO A NORMA ASME MFC-14M-2003

A vazão de ar é medida utilizando uma placa de orifício construída segundo a norma ASME MFC-14M-2003. As medidas da queda de pressão através da placa de orifício e da pressão manométrica à montante da placa são realizadas por dois transdutores de pressão diferencial Smar, modelo LD301. A temperatura do ar de fluidização é determinada através de um termopar tipo T.

O calculo é feito no programa construído em Adobe Flash Player 9 por Cardenas-Fonseca (2009). A interface do programa é mostrada nas Fig. A.1.

O algoritmo para a solução da equação transcendental que permite o cálculo da vazão é baseado no método de Newton Raphson, portanto, o processo de cálculo da vazão de ar é iterativo. O cálculo se inicia assumindo-se um número de Reynolds (Re_D) e, após isso, é determinado o coeficiente de descarga (C), calculada a descarga de ar ($\dot{m}$) e a vazão ($\dot{V}$), depois disso calcula-se o novo número de Reynolds e compara-se com o número de Reynolds assumido inicialmente. Caso estes dois valores estiverem dentro da margem de diferença considerada aceitável, o cálculo é finalizado. Caso contrário, o número de Reynolds calculado é substituído pelo inicialmente assumido com uma correção do método de Newton-Raphson e repetem-se os passos anteriores.

As variáveis de entrada e equações utilizadas para os cálculos são apresentadas a seguir:

Dados de entrada:

- Pressão barométrica: P_{atm} [mmHg]
- Pressão à montante da placa de orifício: P_{mont} [mmca]
- Temperatura a montante: T [ºC]
- Diâmetro da placa de orifício: d_o [mm]
- Diâmetro do duto de medida: d_t [mm]
- Diâmetro interno da coluna do leito: D [mm]

– Pressão diferencial na placa de orifício: ΔP [mmca]

– Coeficiente de compressão adiabática: $k = \frac{Cp}{Cv}$ [adimensional]

– Constante do gás: $R = \frac{\bar{R}}{M}$ [J/mol.K]

- **Equações**

Massa específica do ar (através da equação dos gases ideais):

$$\rho = \frac{P_{atm}+P_{mont}}{R*T} \qquad \left[\frac{kg}{m^3}\right] \tag{A.1}$$

Salienta-se que nessas equações estão todas no S. I.

Viscosidade dinâmica do ar na linha:

$$\mu = 3{,}6*10^{-8}\ T + 1{,}7718\ 10^{-5}\ \text{[kg/m.s]} \tag{A.2}$$

Observações: nesta expressão empírica para a viscosidade dinâmica, a temperatura deve ser dada em graus Celsius.

Beta da placa de orifício:

$$\beta = \frac{d_o}{d_t} \tag{A.3}$$

Coeficiente de descarga:

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

Observações: nesta expressão empírica para o coeficiente de descarga (***C***), o diâmetro do tubo (***d_t***), deve ser usado em polegadas.

Descarga do ar:

$$\dot{m}_a = C * \varepsilon * \frac{\pi}{4} * {d_o}^2 * \sqrt{2 * \Delta P * \rho} \left[\frac{kg}{h}\right] \quad \text{(A.5)}$$

Vazão:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_a}{\rho} \left[\frac{m^3}{h}\right] \quad \text{(A.6)}$$

Número de Reynolds no orifício:

$$Re_D = \frac{4 * \dot{m}_a}{\pi * d_o * \mu} \quad \text{(A.7)}$$

Velocidade superficial do gás na coluna do leito fluidizado:

$$U_o = \frac{4 * \dot{V}}{\pi * D} \left[\frac{m}{s}\right] \quad \text{(A.8)}$$

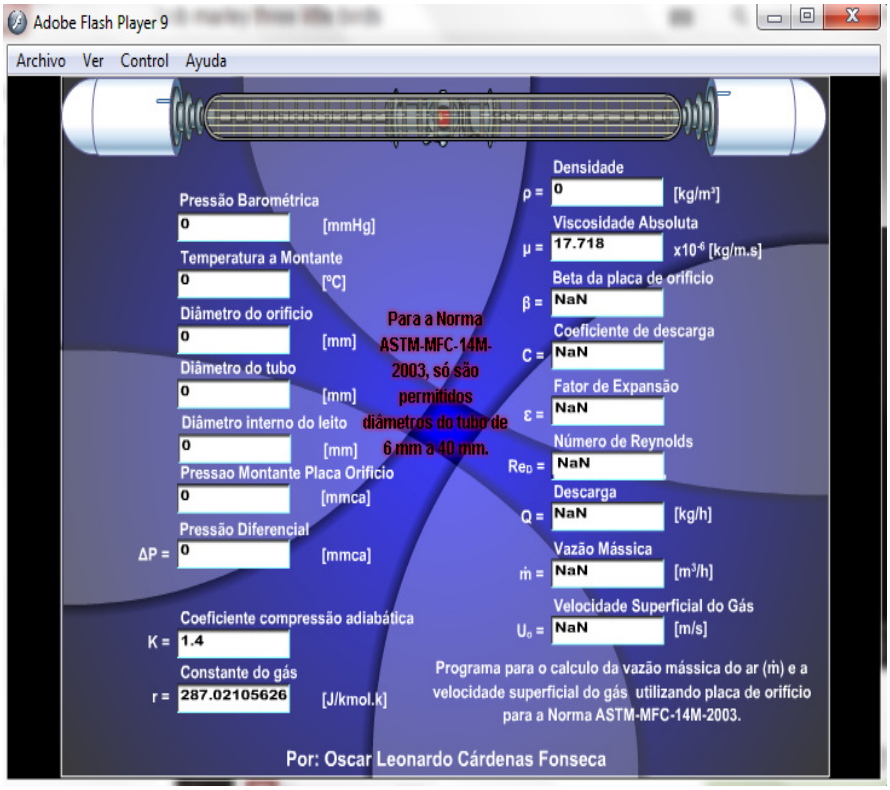


Figura A.1. Apresentação do programa para o cálculo da vazão de ar.

APÊNDICE B PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A seguir é apresentado o programa construído no software Labview para a aquisição das medições de pressão dos três transdutores de pressão instalados no leito:

i. Transdutor de pressão conectado à montante da placa de orifício (Fig. 3.5), cuja medida de pressão é simbolizada por P_{mont} (Fig. 3.5).

ii. Transdutor de pressão conectado à placa de orifício, cuja medida de pressão é simbolizada por ΔP_{or}.

iii. Transdutor de pressão conectado à coluna principal do sistema experimental, uma tomada localizada abaixo da placa distribuidora e outra à altura de 35 cm acima da placa distribuidora, cuja medida de pressão é simbolizada por $\Delta P'_L$ (Fig. 3.5).

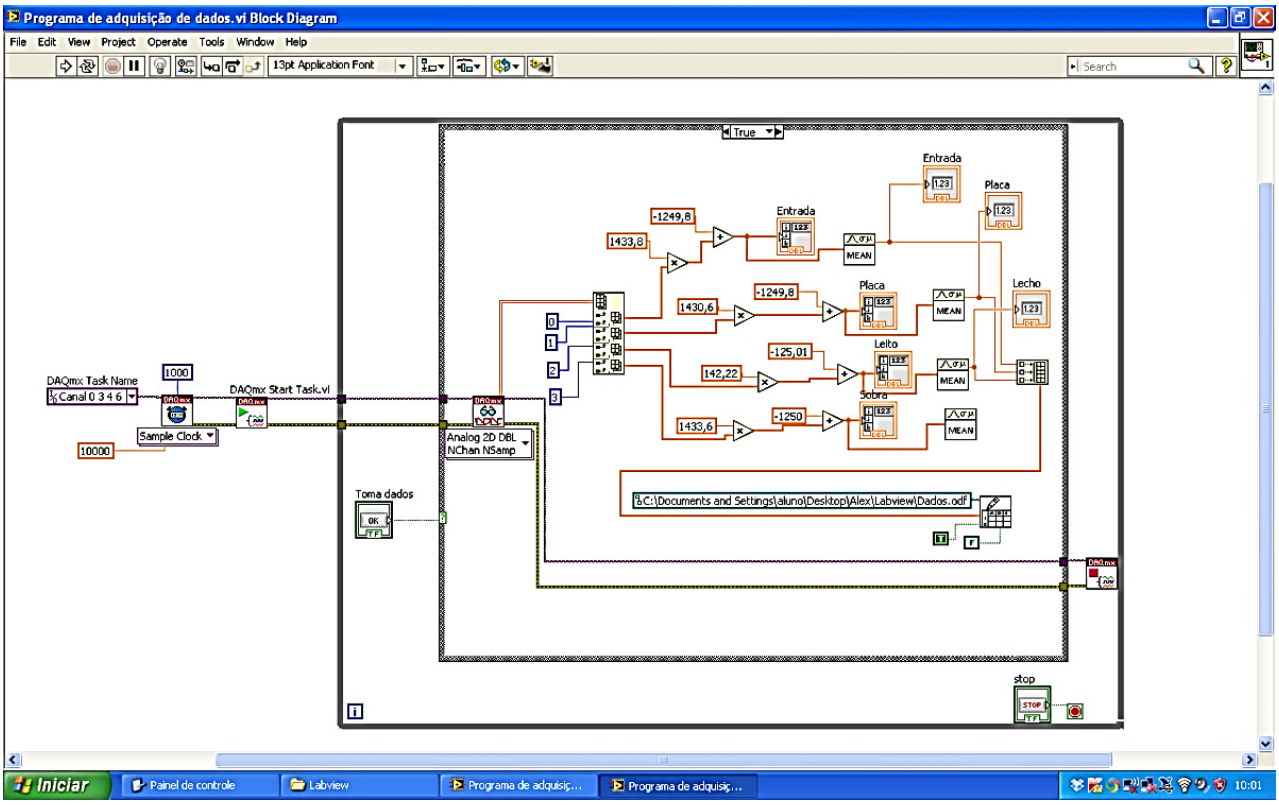


Figura B.1. Diagrama a blocos para aquisição dos dados de pressão.

A Figura B.1 apresenta o diagrama de blocos usado para a comunicação entre os transdutores Smart e a placa de aquisição de dados da National Instruments (NI) da série NI USB – 6255.

A Figura B.2 exibe a interface de apresentação dos resultados das medições.

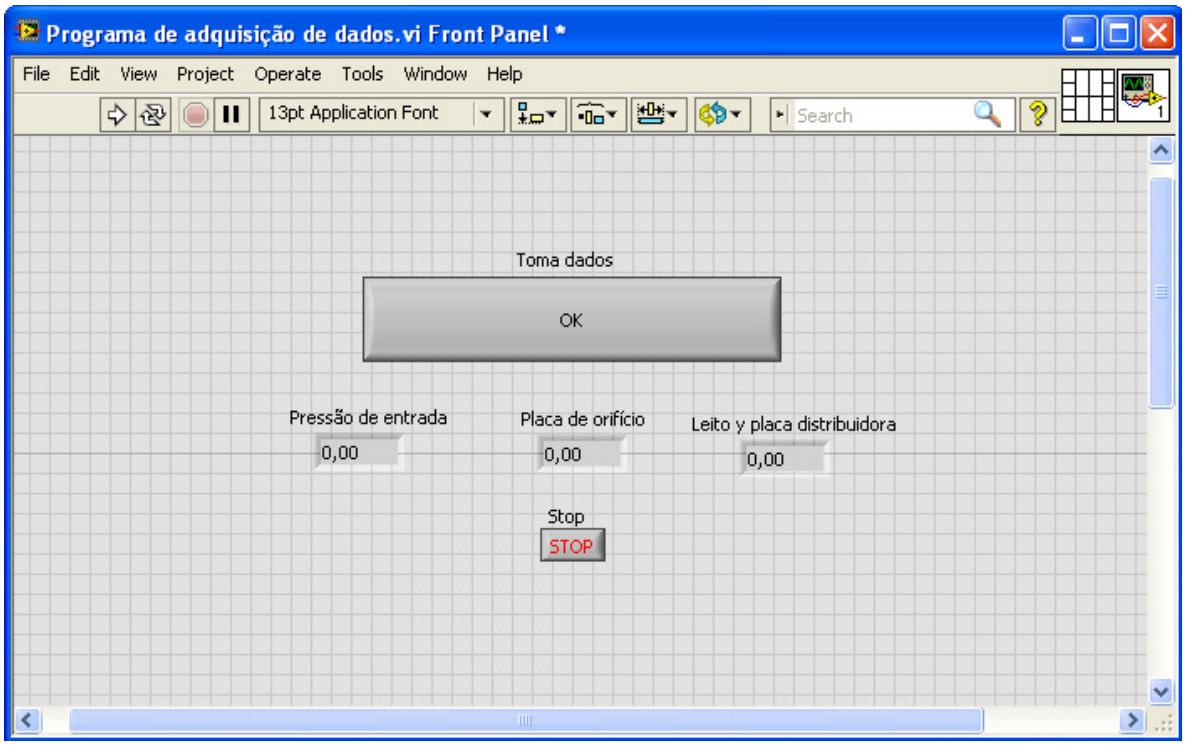


Figura B.2. Interface de apresentação dos resultados.

APÊNDICE C MÉTODO PARA CÁLCULO DA MASSA DE CADA COMPONENTE NAS MISTURAS BINÁRIAS

O método descrito nesta seção foi utilizado para a preparação das misturas binárias, na composição desejada, usadas no presente estudo.

A densidade da mistura (ρ_M) é expressa por meio da Eq. (C.1), em função da massa da mistura (m_M) e seu volume (V_M). Da suposição de que o volume da mistura (V_M) é a soma dos volumes da biomassa ($V_{biomassa}$) e da areia (V_{areia}), obtêm-se a Eq. (C.2).

$$\rho_M = \frac{m_M}{V_M} \tag{C.1}$$

$$V_M = V_{biomassa} + V_{areia} \tag{C.2}$$

Logo, substituindo a Eq. (C.2) na Eq. (C.1) obtêm-se a Eq. (C.3).

$$\rho_M = \frac{m_M}{V_{biomassa} + V_{areia}} \tag{C.3}$$

Partindo dos componentes separados, formando duas camadas e conhecida a densidade do leito empacotado livremente da biomassa ($\rho_{bulk.biomassa}$) e da areia ($\rho_{bulk.areia}$), pode-se relacionar o volume da biomassa e da areia ($V_{biomassa}$ e V_{areia}) com as suas respectivas massas e densidades do leito empacotado livremente, Eqs. (C.5) e (C.6).

$$V_{biomassa} = \frac{m_{biomassa}}{\rho_{bulk.biomassa}} \tag{C.5}$$

$$V_{areia} = \frac{m_{areia}}{\rho_{bulk.areia}} \tag{C.6}$$

A fração mássica da biomassa e da areia ($x_{biomassa}$ e x_{areia}) é função da soma das suas massas e pelo tanto da m_M, Eq. (C.7) e (C.8).

$$x_{biomassa} = \frac{m_{biomassa}}{m_{biomassa}+m_{areia}} = \frac{m_{biomassa}}{m_M} \tag{C.7}$$

$$x_{areia} = \frac{m_{areia}}{m_{biomassa}+m_{areia}} = \frac{m_{areia}}{m_M} \tag{C.8}$$

Rescrevendo as Eqs. (C7) e (C8), obtêm-se as Eqs. (C.9) e (C.10).

$$m_{biomassa} = x_{biomassa} m_M \tag{C.9}$$

$$m_{areia} = x_{areia} m_M \tag{C.10}$$

Substituindo as Eqs. (C.5) e (C.6) em (C.3), e posteriormente as Eqs. (C.9) e (C.10), obtêm-se a Eq. (C.11)

$$\rho_M = \frac{m_M}{\frac{m_{biomassa}}{\rho_{bulk.biomassa}}+\frac{m_{areia}}{\rho_{bulk.areia}}} = \frac{m_M}{m_M\left(\frac{x_{biomassa}}{\rho_{biomassa}}+\frac{x_{areia}}{\rho_{areia}}\right)} = \frac{1}{\frac{x_{biomassa}}{\rho_{biomassa}}+\frac{x_{areia}}{\rho_{areia}}} \tag{C.11}$$

Se a soma das frações mássicas dos componentes da mistura é igual à unidade, a x_{areia} pode ser função da $x_{biomassa}$, Eq. (C.12).

$$x_{areia} = 1 - x_{biomassa} \tag{C.12}$$

Substituindo a Eq. (C.12) na Eq. (C.11), temos a Eq. (C.13).

$$\rho_M = \frac{1}{\frac{x_{biomassa}}{\rho_{biomassa}}+\frac{1-x_{biomassa}}{\rho_{areia}}} \tag{C.13}$$

Substituindo a Eq. (C.13) na Eq. (C.1) e isolando m_M obtêm-se a Eq. (C.14).

$$m_M = \frac{V_M}{\frac{x_{biomassa}}{\rho_{biomassa}} + \frac{1-x_{biomassa}}{\rho_{areia}}} \quad \text{(C.14)}$$

Nos testes, o volume estático do leito (V_L) foi mantido constante, uma vez que a altura do leito (H) e o diâmetro do leito (D) foram fixados, o V_M é calculado por meio da Eq. (C.15).

$$V_M = \frac{1}{4}\pi D^2 H \quad \text{(C.15)}$$

Portanto, a quantidade de massa de biomassa e de areia na mistura em função das suas frações mássicas, foi obtida por meio da substituição da Eq. (C.14) nas Eqs. (C.9) e (C.10), como é apresentado nas Eqs. (C.14) e (C.15).

$$m_{biomassa} = \frac{x_{biomassa} V_M}{\frac{x_{biomassa}}{\rho_{biomassa}} + \frac{1-x_{biomassa}}{\rho_{areia}}} \quad \text{(C.14)}$$

$$m_{areia} = \frac{x_{areia} V_M}{\frac{x_{biomassa}}{\rho_{biomassa}} + \frac{1-x_{biomassa}}{\rho_{areia}}} \quad \text{(C.15)}$$

APÊNDICE D RESULTADOS DOS TESTES FLUIDODINÂMICOS

Neste apêndice são apresentadas as figuras correspondentes às curvas fluidodinâmicas obtidas nos ensaios 1, 2 e 3 para cada material ensaiado. Leitos compostos por:

- 5 tipos de areia a uma relação *H/D* =1;
- 5 misturas binárias contendo 95% de areia e 5% de bambu *in natura* a uma relação *H/D* = 1 variando o tamanho da areia;
- 3 misturas binárias contendo 95% de areia 3 e 5% de bambu *in natura* variando a relação *H/D*;
- 5 misturas binárias areia 3-bambu *in natura* a uma relação *H/D* =1 variando a composição do leito.
- 5 misturas binárias areia 3-carvão a uma relação *H/D* =1 variando a composição do leito.

D.1. Testes com o leito composto por apenas areia, *H/D* = 1

D.1.1. Areia 1, $\overline{dp}$ = 231 μm, *H/D* = 1

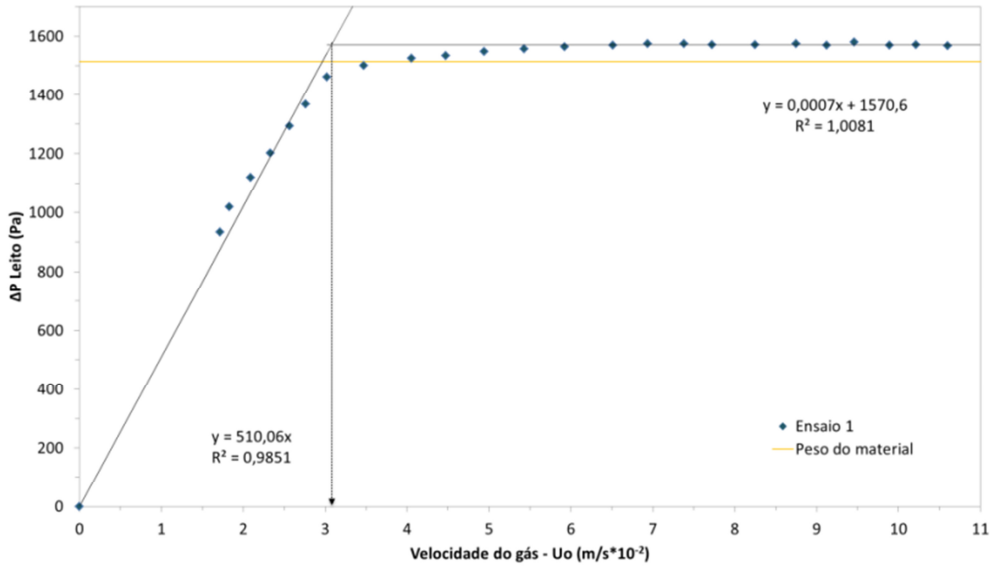


Figura D.1. Ensaio 1.

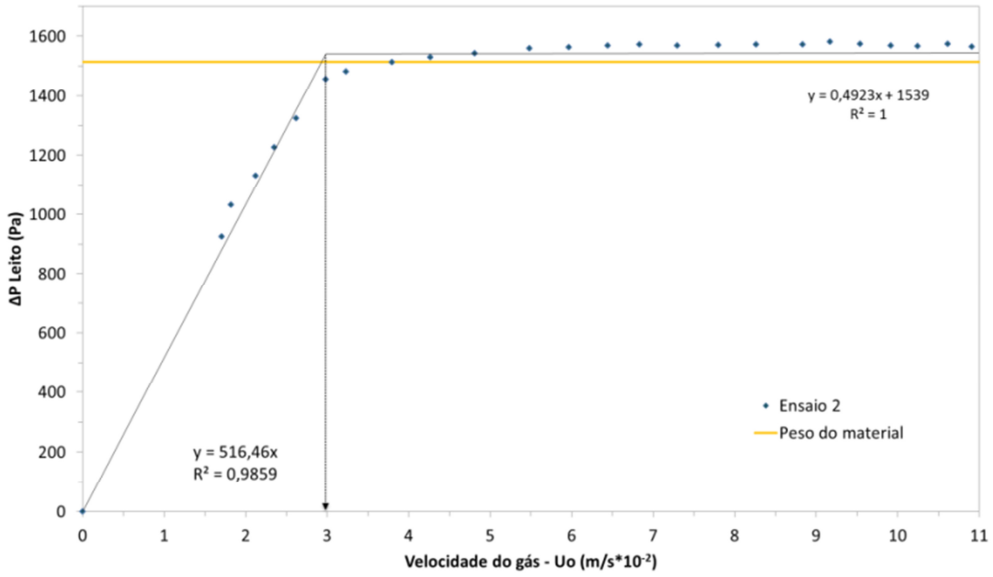


Figura D.2. Ensaio 2.

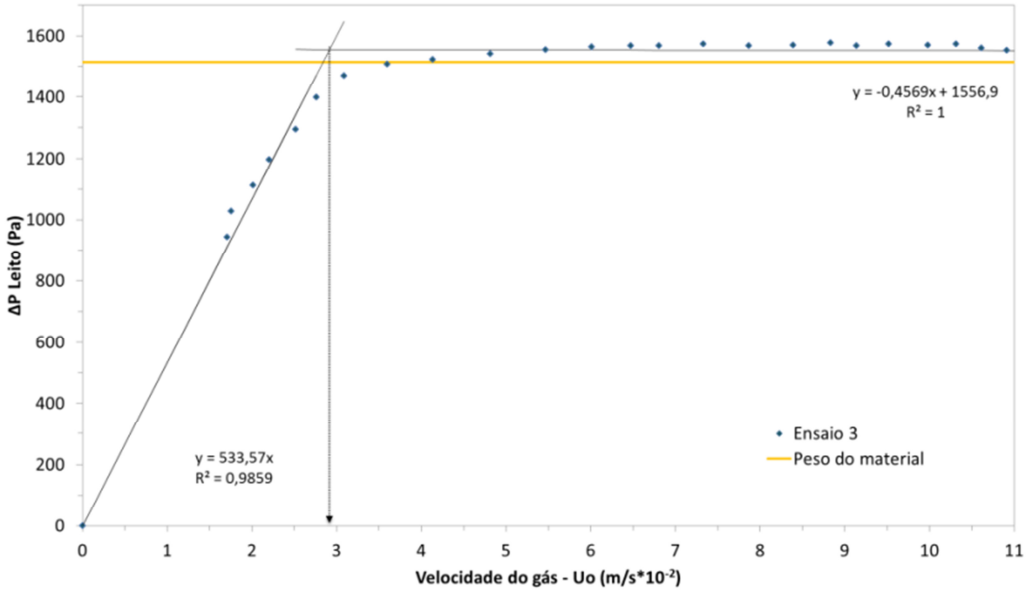


Figura D.3. Ensaio 3.

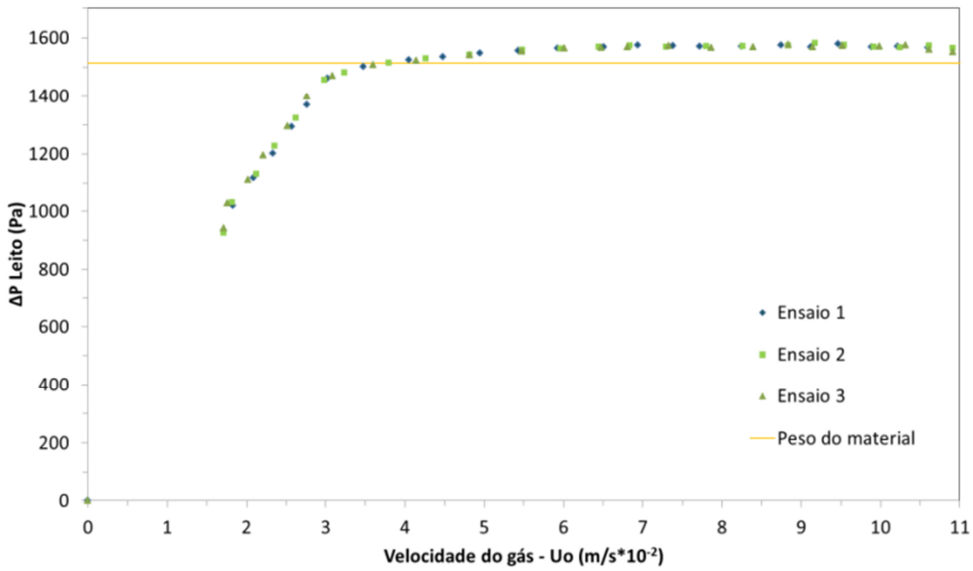


Figura D.4. Ensaios combinados.

D.1.2. Areia 2, $\overline{dp}$ = 324 μm, H/D = 1

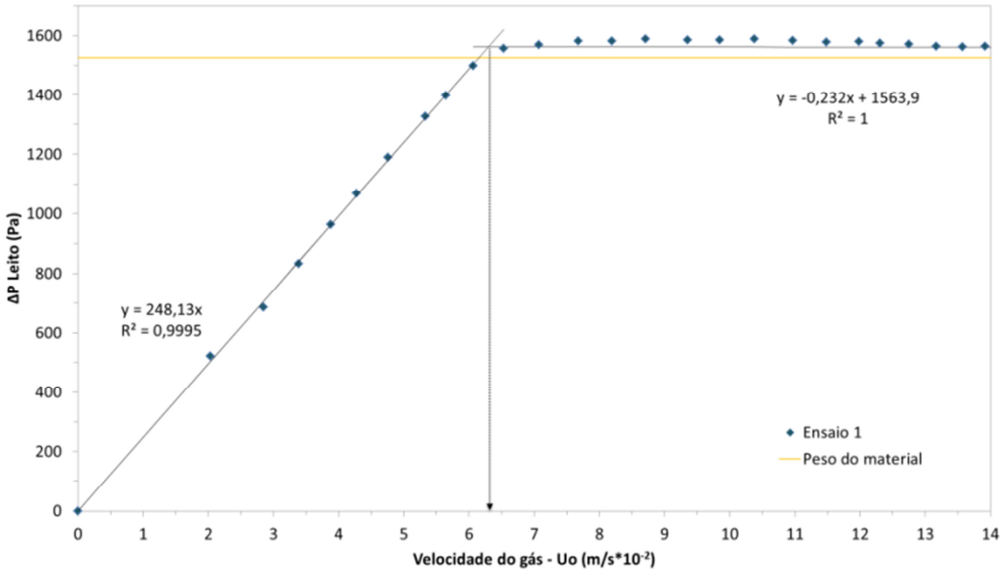


Figura D.5. Ensaio 1.

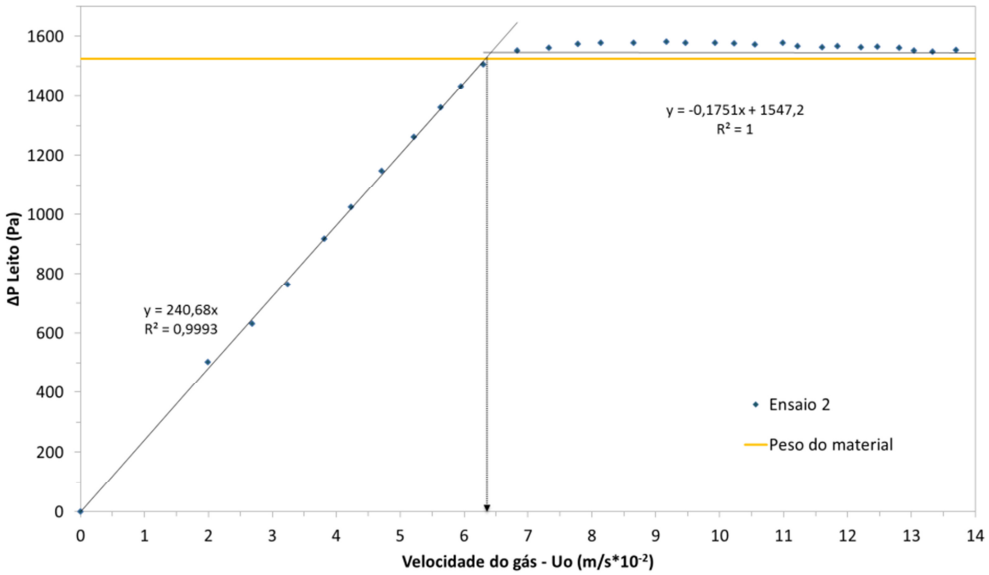


Figura D.6. Ensaio 2.

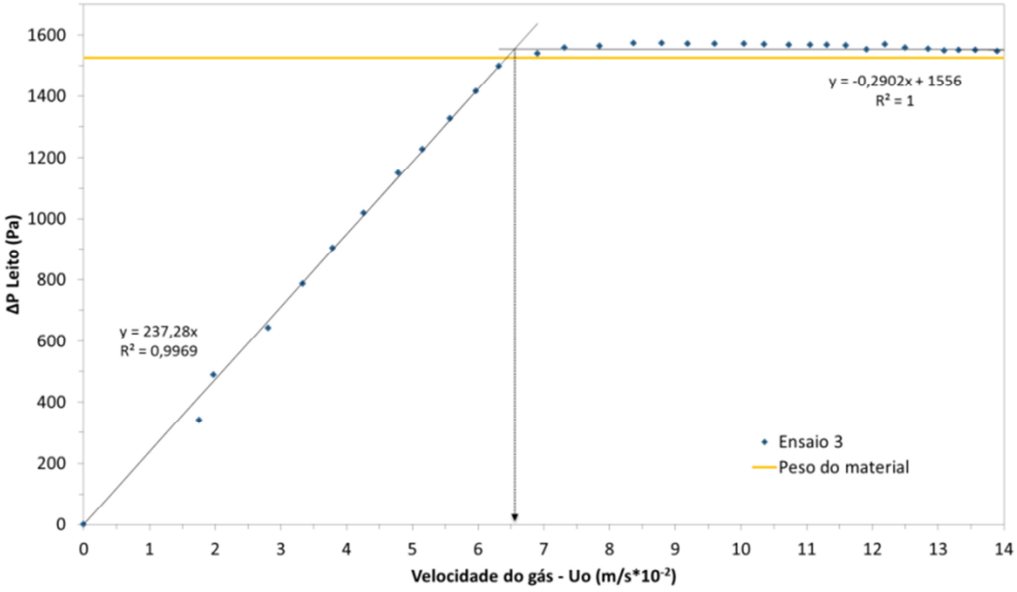


Figura D.7. Ensaio 3.

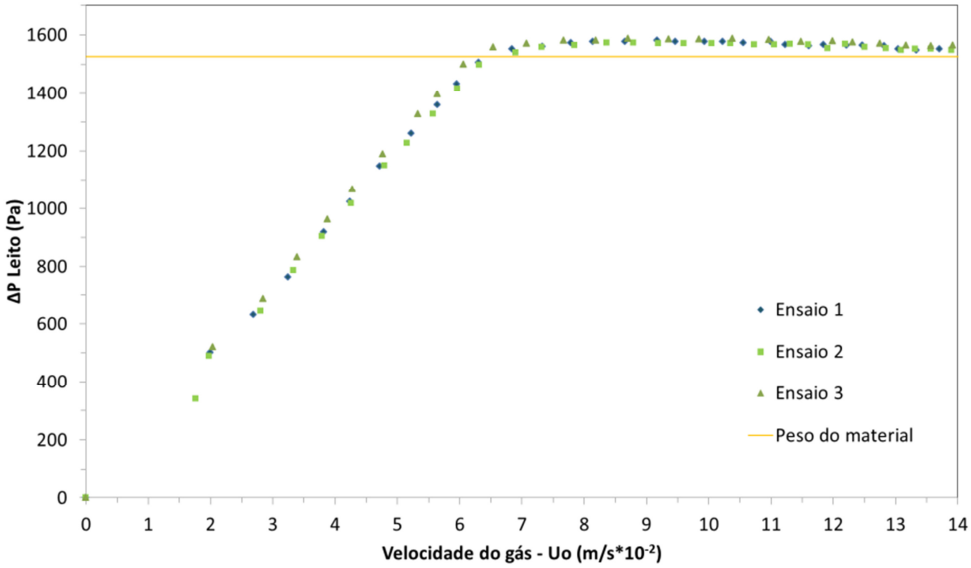


Figura D.8. Ensaios combinados.

D.1.3. Areia 3, $\overline{dp}$ = 460 μm, H/D = 1

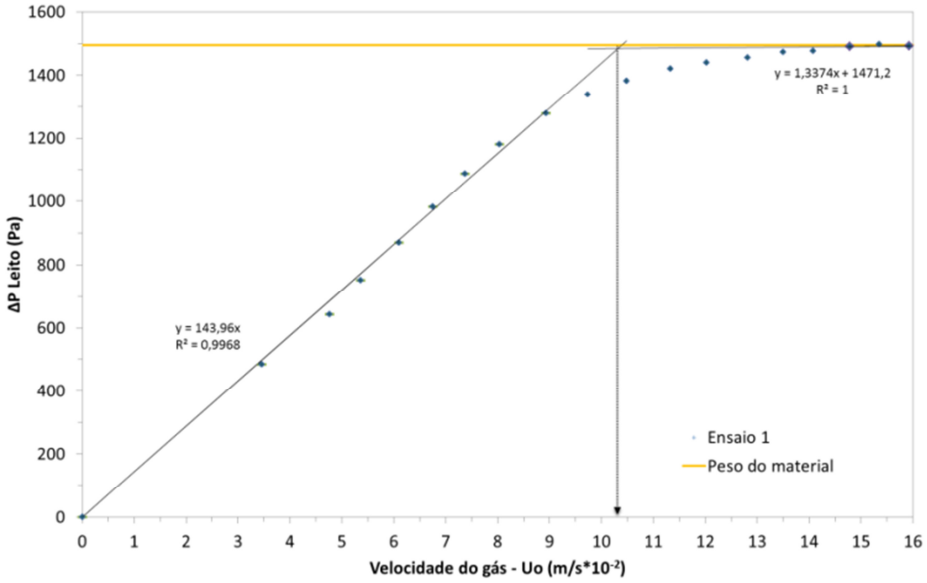


Figura D.9. Ensaio 1.

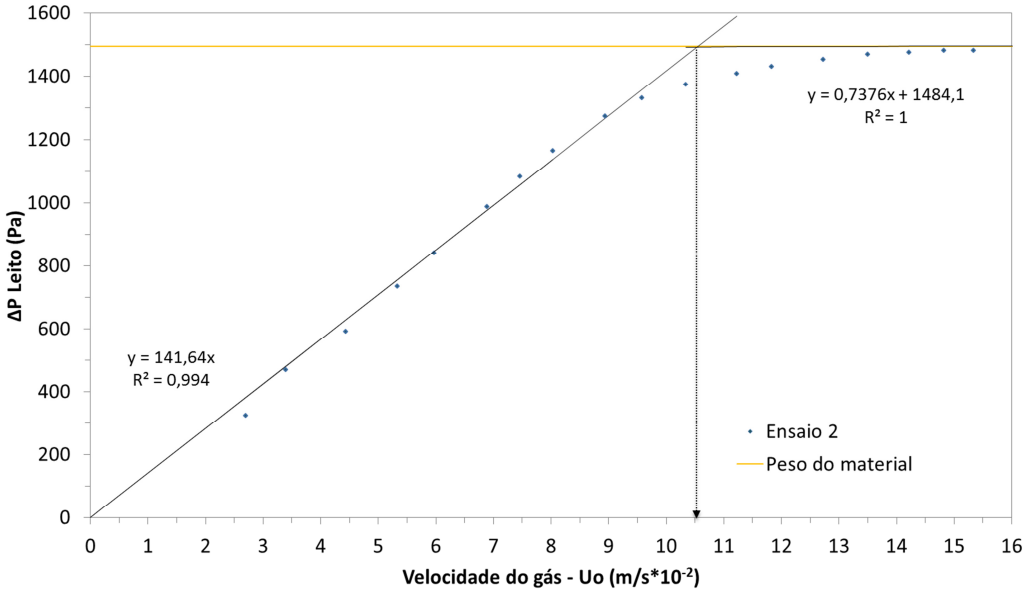


Figura D.10. Ensaio 2.

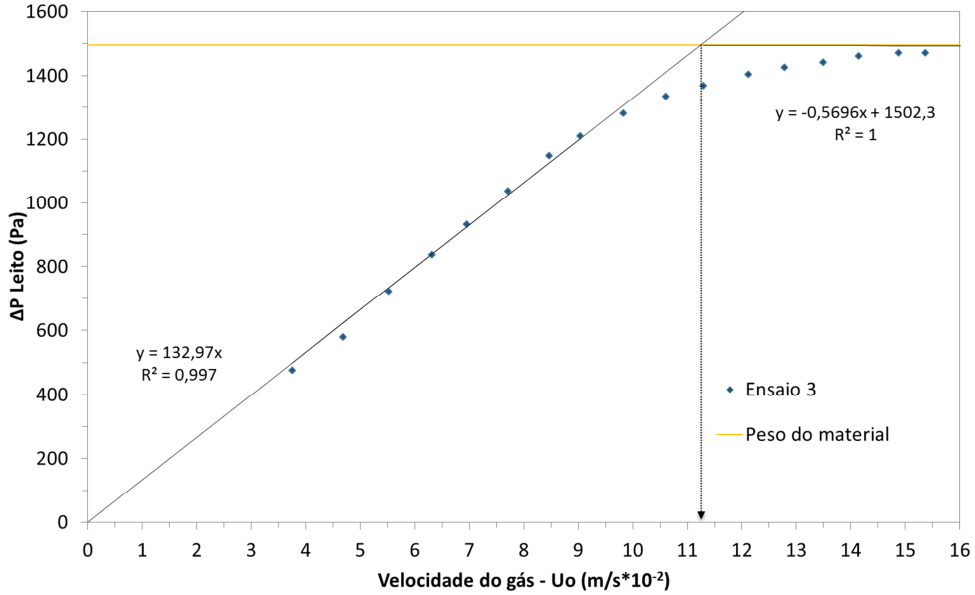


Figura D.11. Ensaio 3.

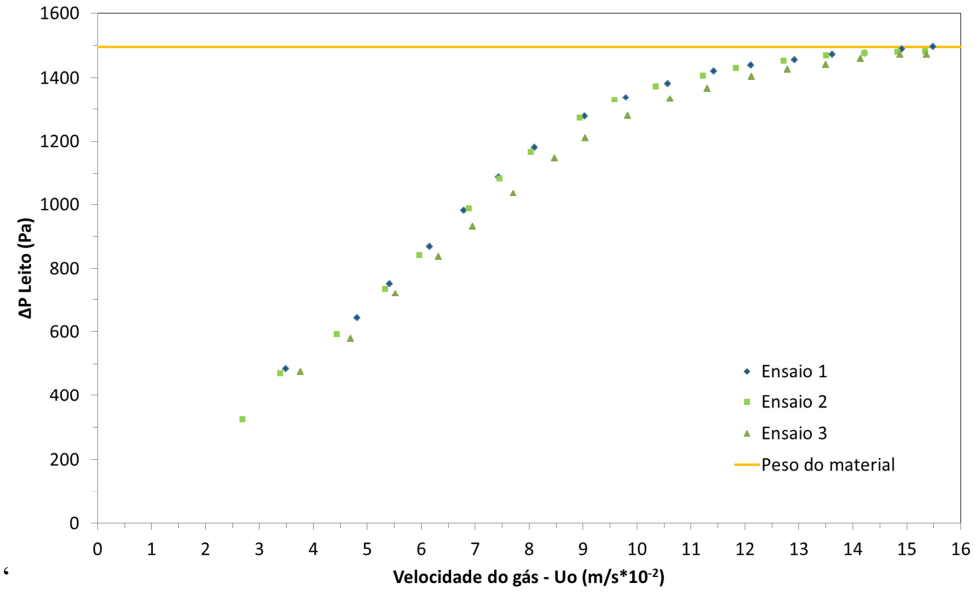


Figura D.12. Ensaios combinados.

D.1.4. Areia 4, $\overline{dp}$ = 653 μm, H/D = 1

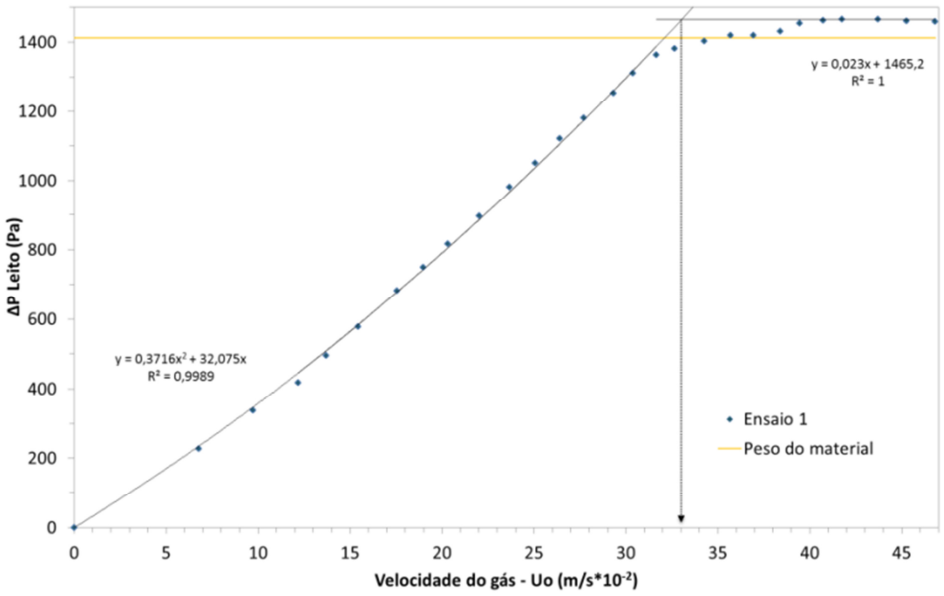


Figura D.13. Ensaio 1.

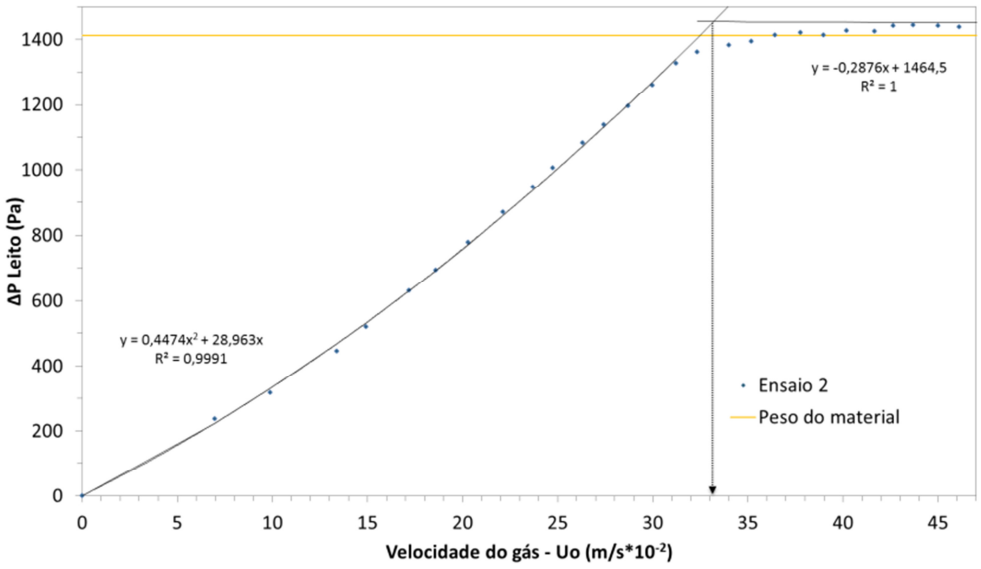


Figura D.14. Ensaio 2.

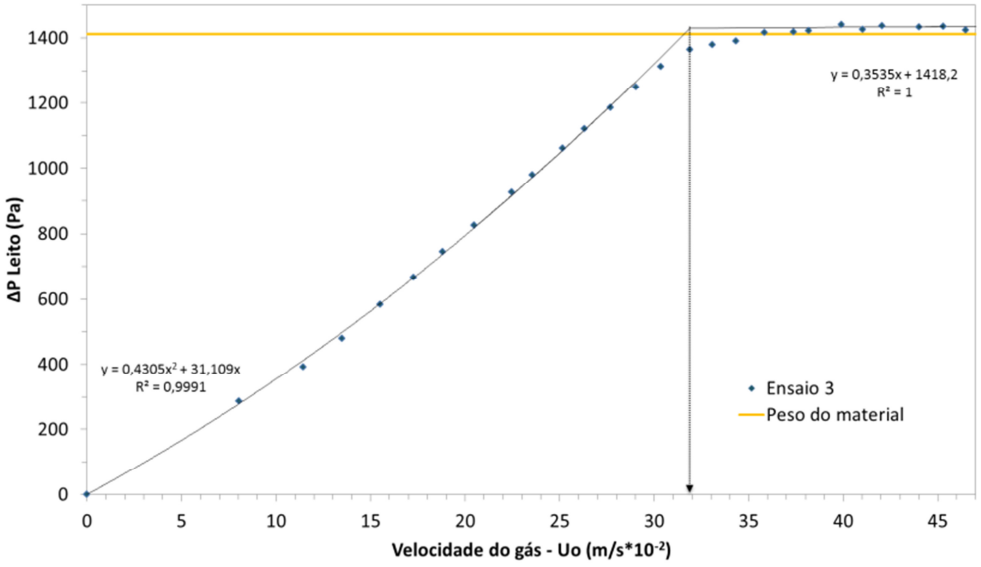


Figura D.15. Ensaio 3.

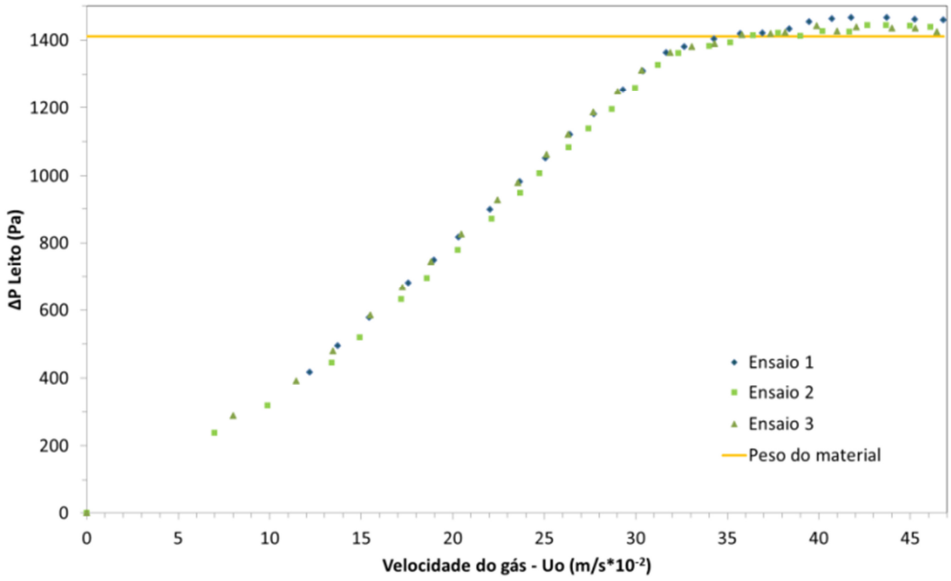


Figura D.16. Ensaios combinados.

D.1.5. Areia 5, $\overline{dp}$ = 920 μm, H/D = 1

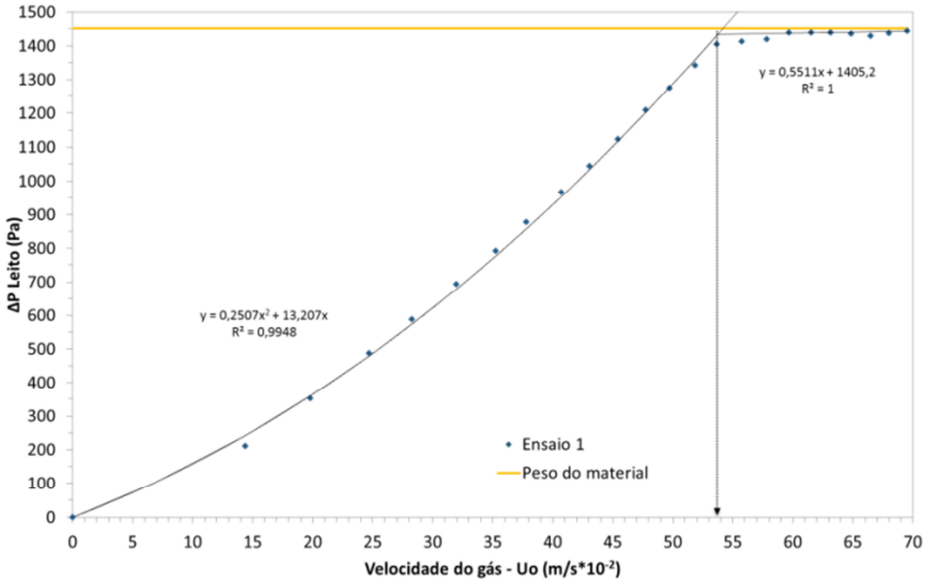


Figura D.17. Ensaio 1.

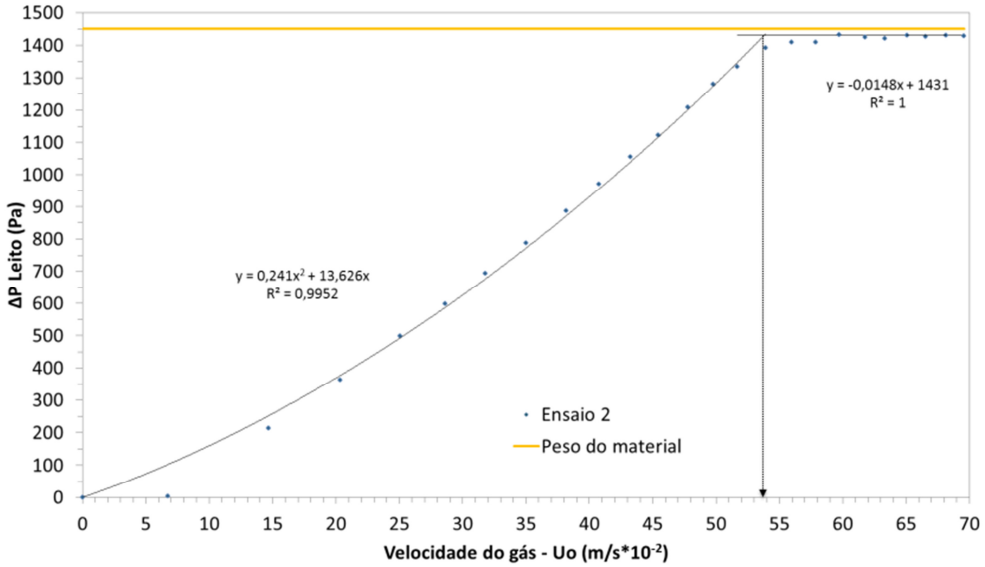


Figura D.18. Ensaio 2.

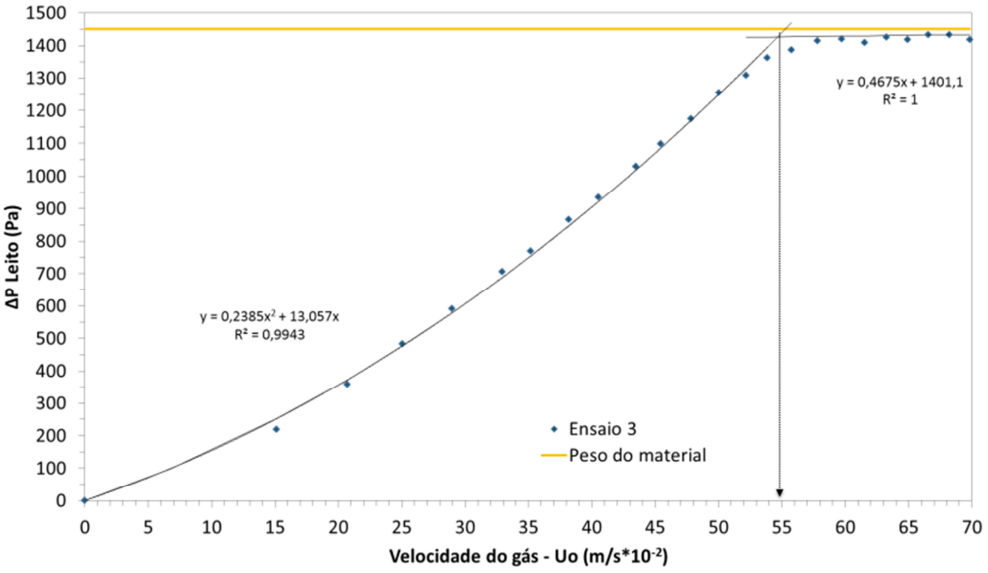


Figura D.19. Ensaio 3.

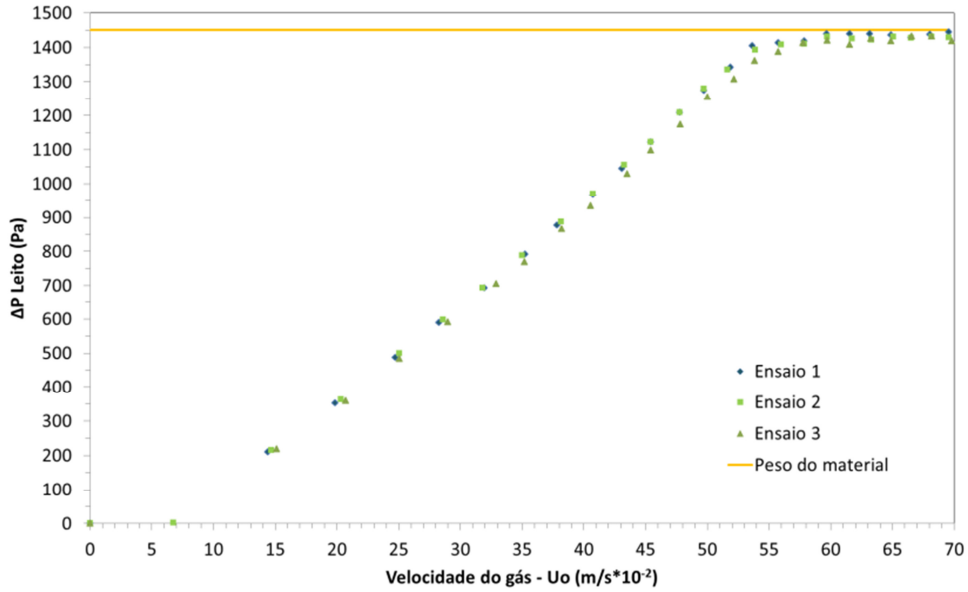


Figura D.20. Ensaios combinados.

Tabela D.1. U_{mf} dos ensaios do leito composto por apenas areia, H/D = 1.

Componente no leito	$\overline{d_p}$ **(**μm**)**	**Ensaio 1**	**Ensaio 2**	**Ensaio 3 (**10^{-2} m/s**)**	$\overline{U_{mf}}$	$\overline{\Delta U_{mf}}$
Areia 1	231	3,1	3,0	2,9	3,0	0,1
Areia 2	324	6,3	6,4	6,6	6,4	0,2
Areia 3	460	10,3	10,5	11,3	10,7	0,5
Areia 4	653	33,1	33,2	31,9	32,7	0,7
Areia 5	920	53,8	53,8	54,7	54,1	0,5

D.2. Testes fluidodinâmicos variando o tamanho da areia em misturas binarias compostas por 95% de areia e 5% de bambu *in natura*, *H/D* = 1

D.2.1. Mistura binaria 95% de areia 1 ($\overline{dp}$ = 231 μm) e 5% de bambu in natura, *H/D* = 1

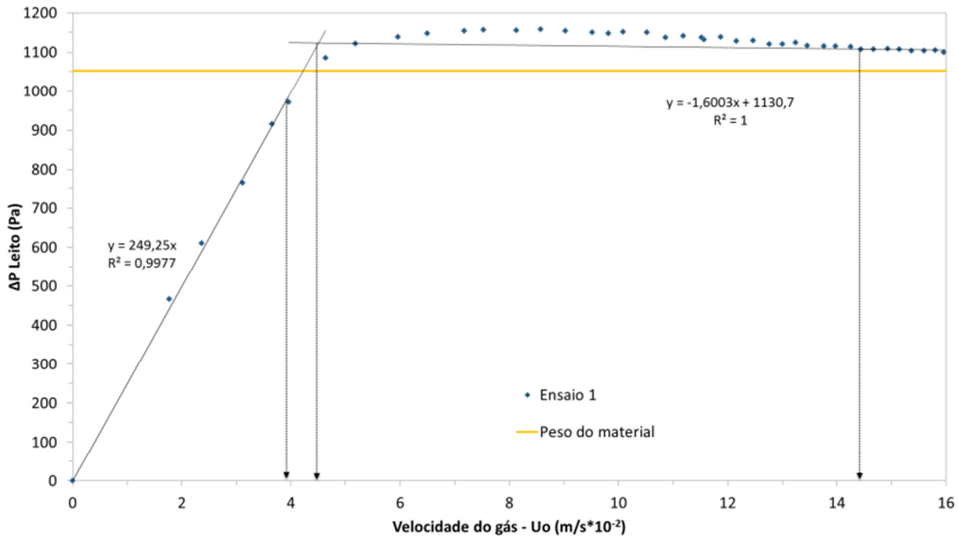


Figura D.21. Ensaio 1.

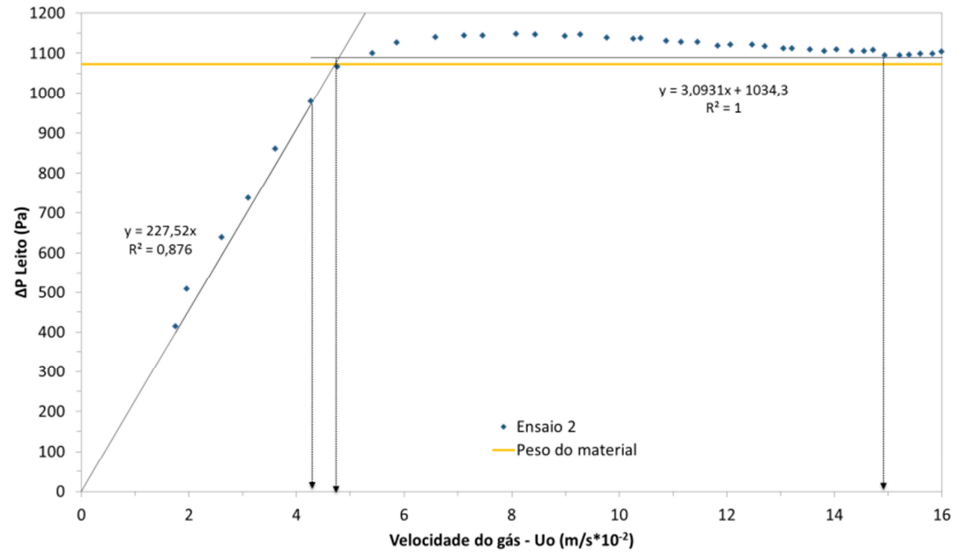


Figura D.22. Ensaio 2.

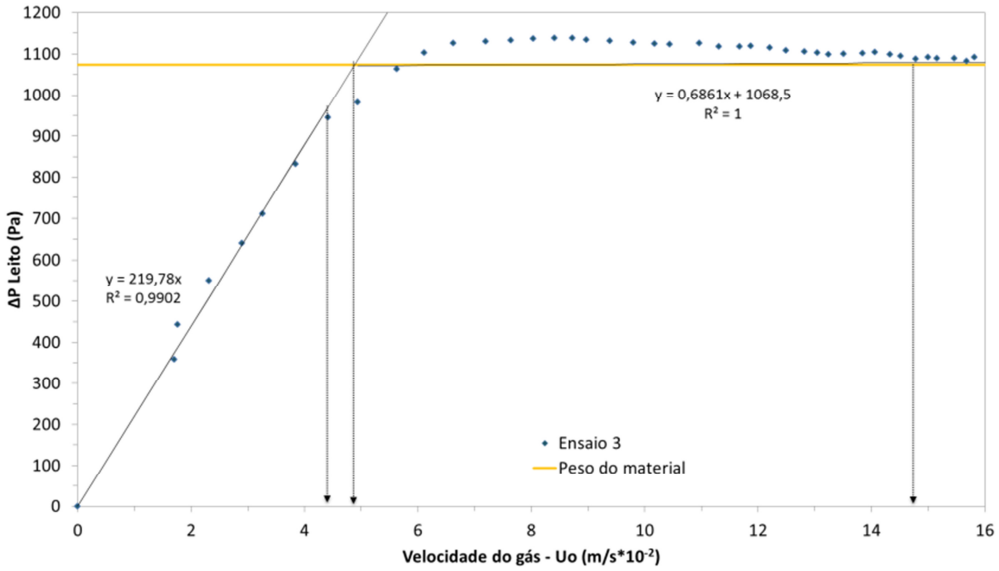


Figura D.23. Ensaio 3.

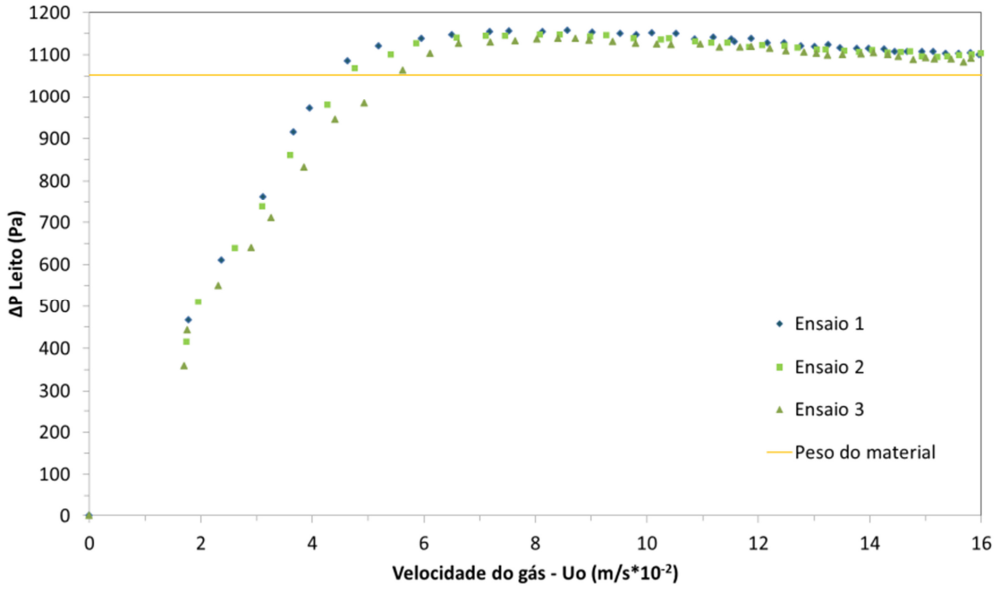


Figura D.24. Ensaios combinados.

D.2.2. Mistura binaria 95% de areia 2 ($\overline{dp}$ = 324 μm) e 5% bambu in natura, H/D = 1

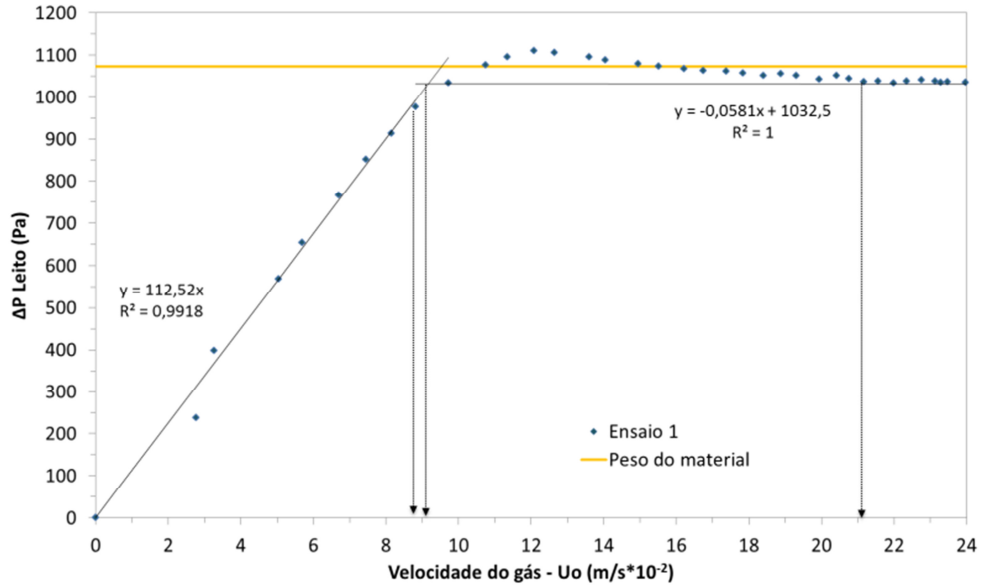


Figura D.25. Ensaio 1.

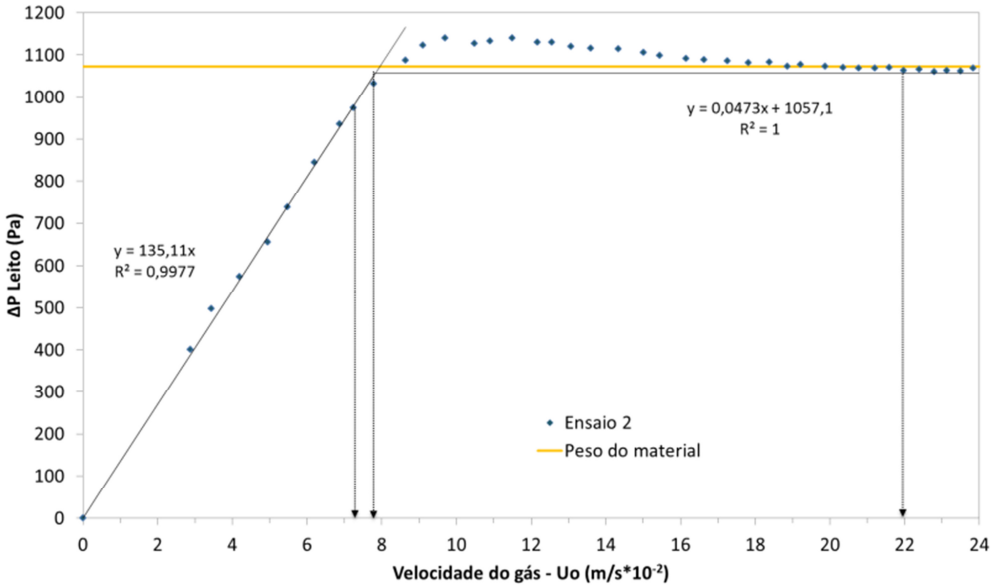


Figura D.26. Ensaio 2.

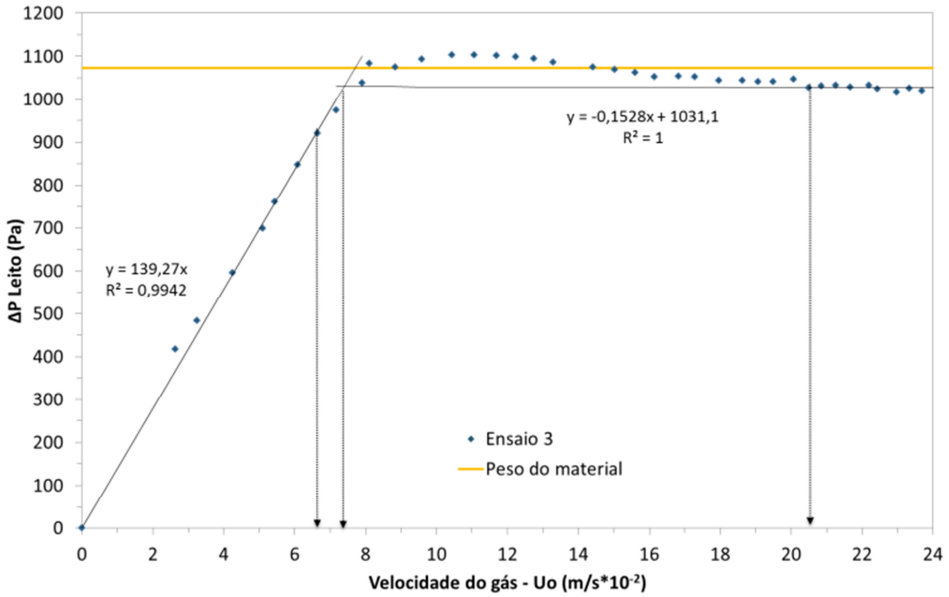


Figura D.27. Ensaio 3.

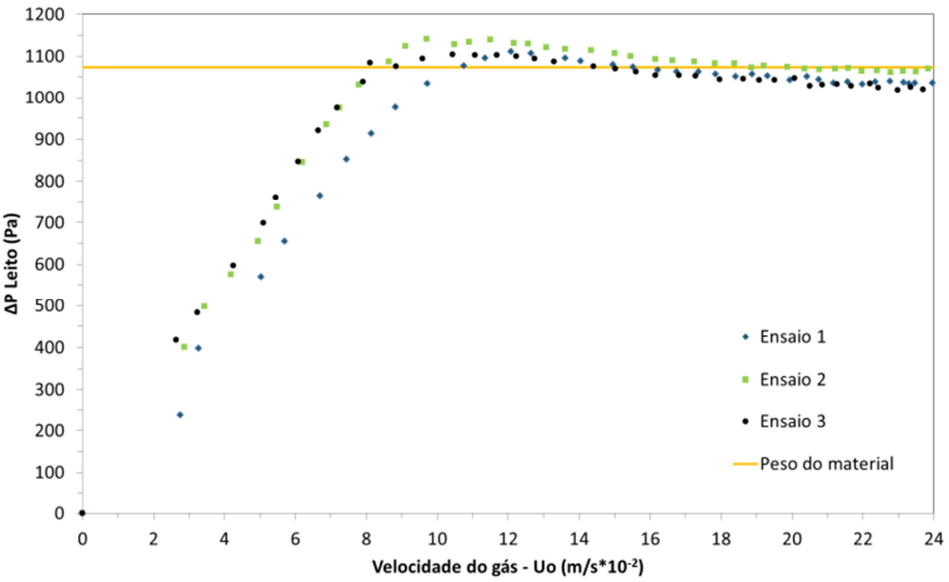


Figura D.28. Ensaios combinados.

D.2.3. Mistura binaria 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura*, *H/D* = 1

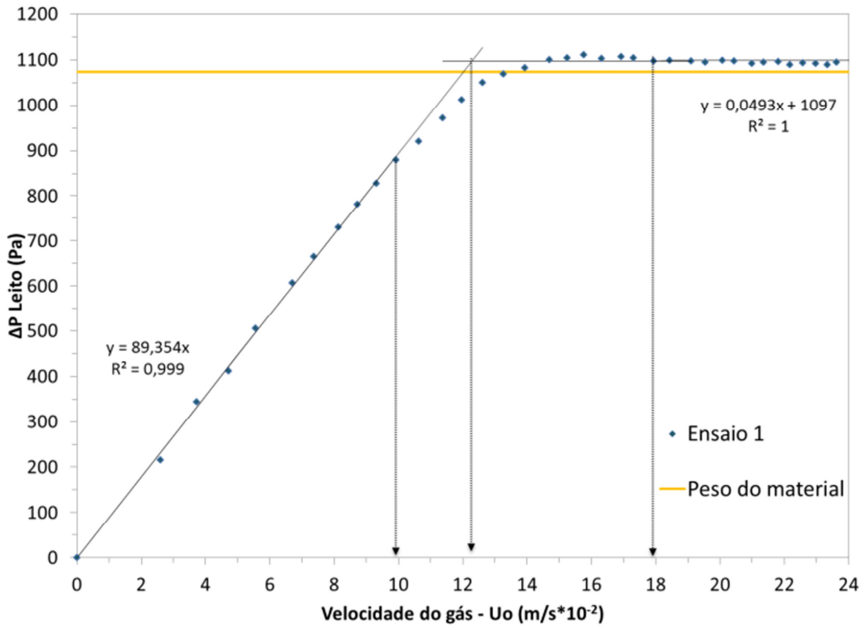


Figura D.29. Ensaio 1.

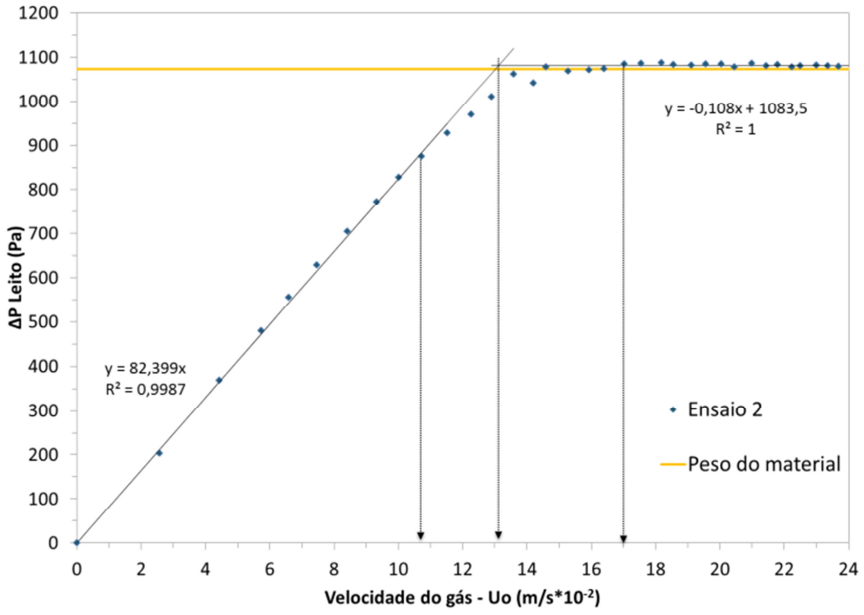


Figura D.30. Ensaio 2.

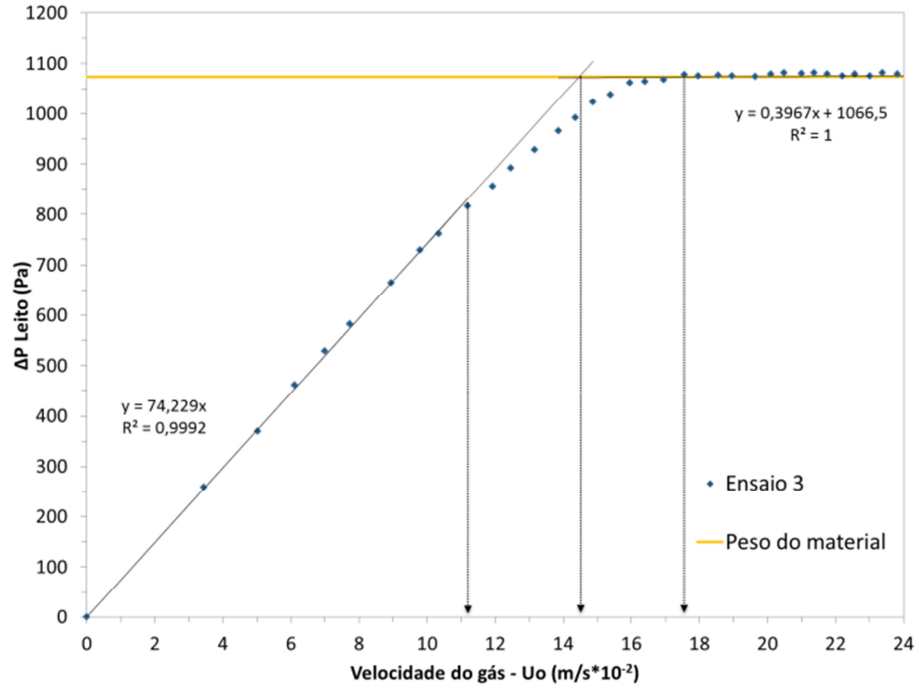


Figura D.31. Ensaio 3.

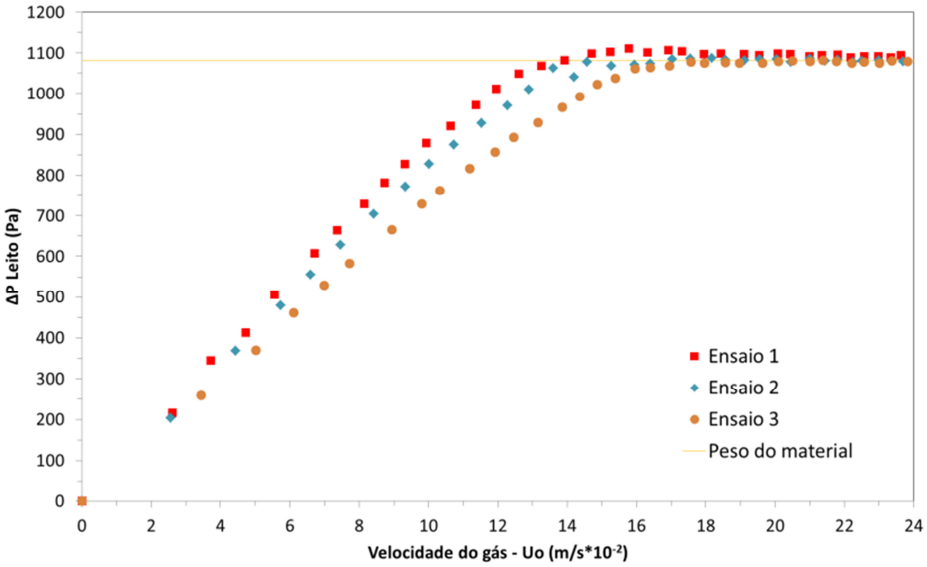


Figura D.32. Ensaios combinados.

D.2.4. Mistura binaria 95% de areia 4 ($\overline{dp}$ = 653 μm) e 5% de bambu *in natura*, *H/D* = 1

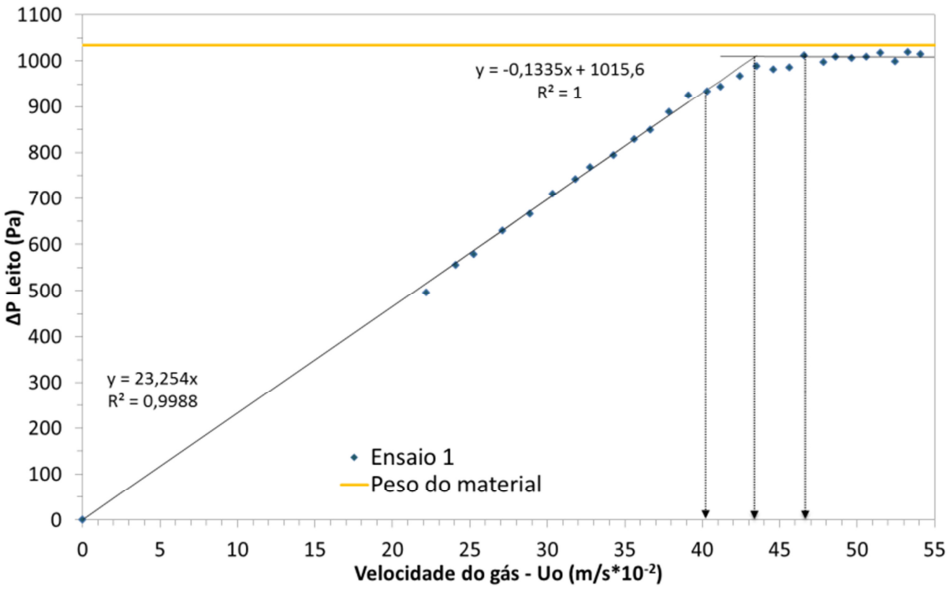


Figura D.33. Ensaio 1.

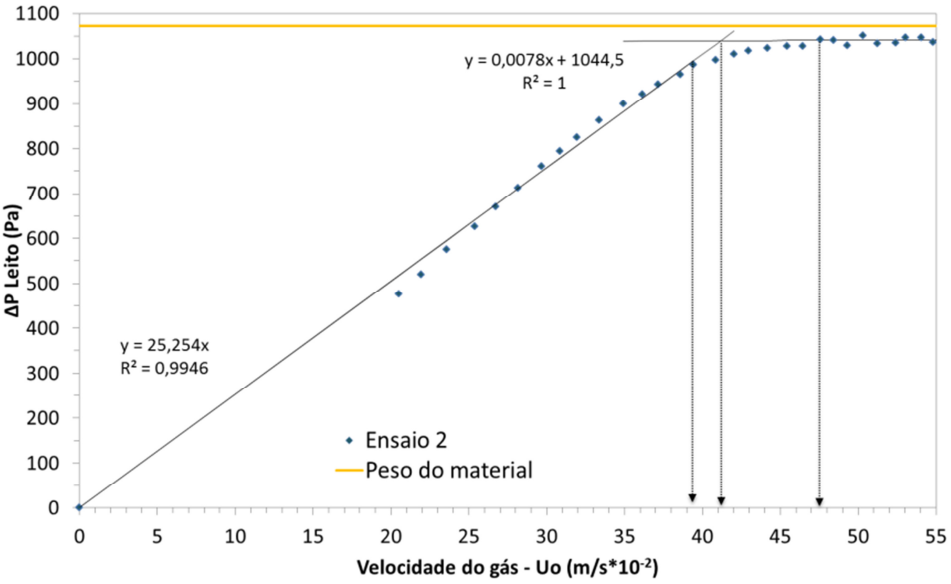


Figura D.34. Ensaio 2.

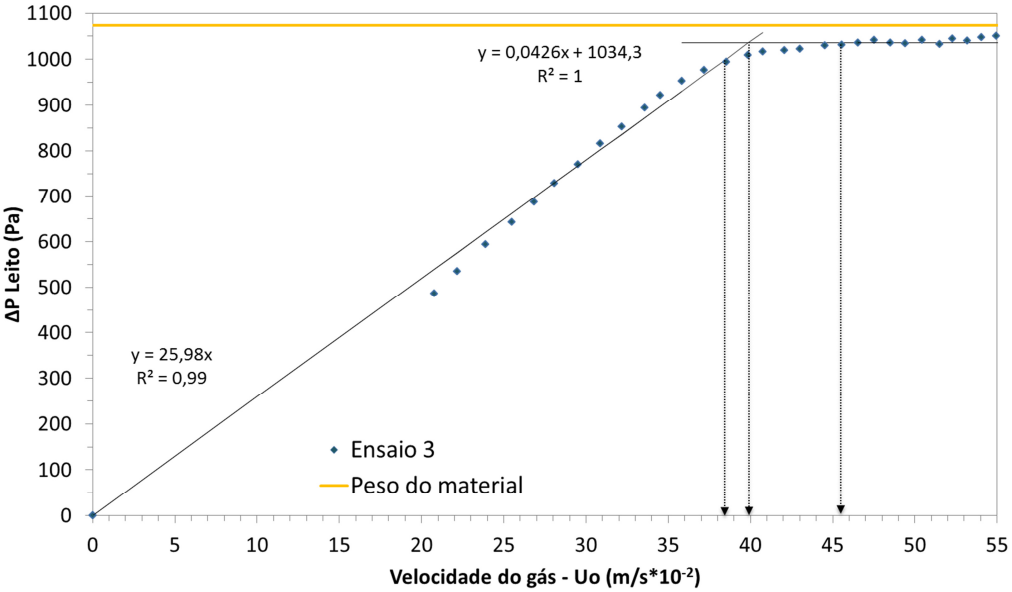


Figura D.35. Ensaio 3.

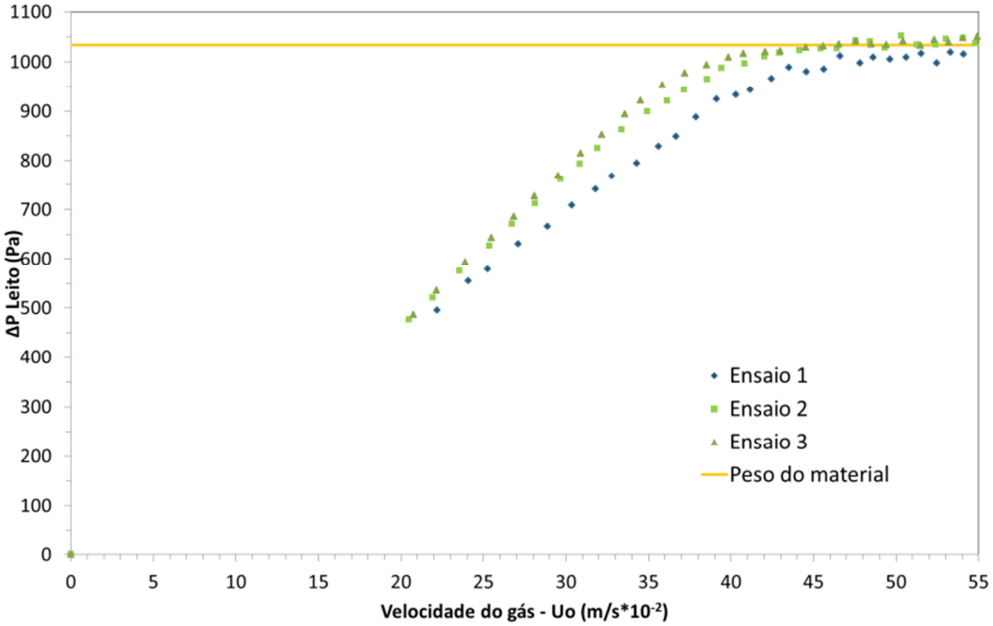


Figura D.36. Ensaios combinados.

D.2.5. Mistura binaria 95% de areia 5 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 5% de bambu in natura, H/D = 1

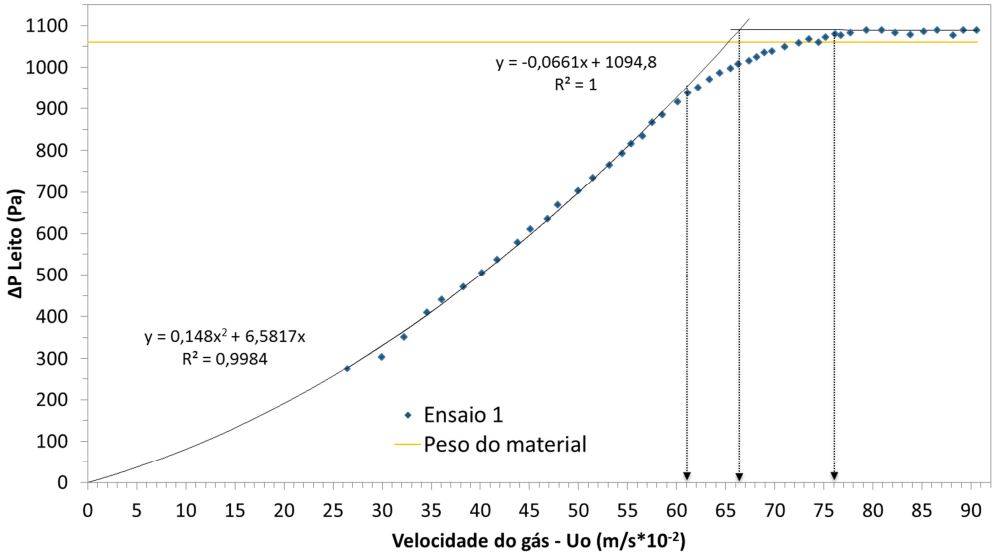


Figura D.37. Ensaio 1.

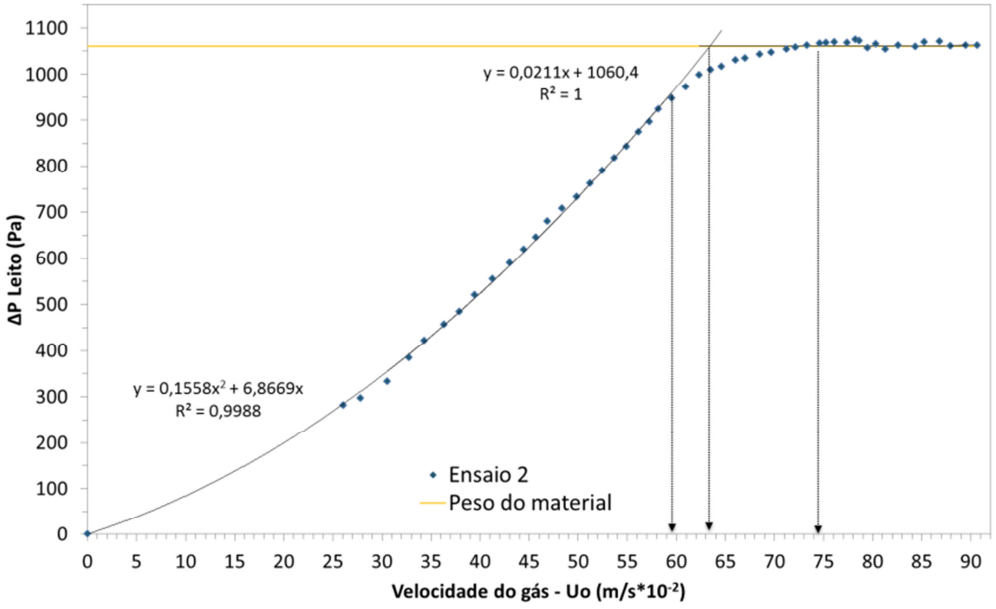


Figura D.38. Ensaio 2.

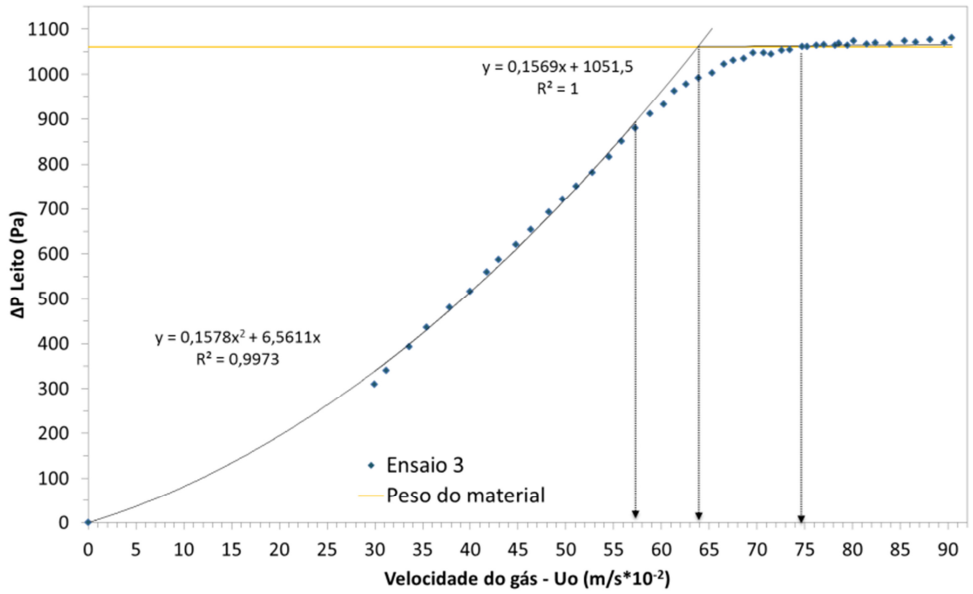


Figura D.39. Ensaio 3.

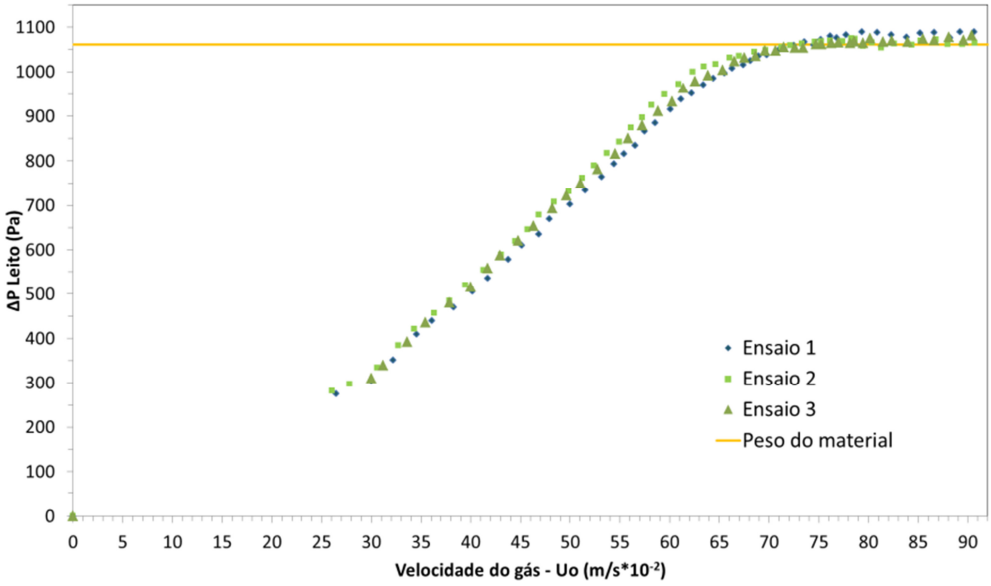


Figura D.40. Ensaios combinados.

Tabela D.2. U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} dos ensaios fluidodinâmicos do leito composto com 95% de areia e 5% de bambu *in natura*, *H/D* = 1.

Composição do leito		U	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	$\bar{U}$	$\overline{\Delta U}$
				(10^{-2} m/s)			
5% areia 1	95% de bambu *in natura*	U_{if}	4	4,3	4,4	4,2	0,4
		U_{mf}	4,5	4,6	4,9	4,7	0,2
		U_{cf}	14,4	14,9	14,8	14,7	0,3
5% areia 2		U_{if}	8,8	7,2	6,6	7,5	1,1
		U_{mf}	9,2	7,8	7,4	8,1	0,9
		U_{cf}	21,2	22	20,5	21,2	0,8
5% areia 3		U_{if}	9,9	10,7	11,2	10,6	0,7
		U_{mf}	12,3	13,3	14,4	13,3	1,1
		U_{cf}	17,9	17	17,6	17,5	0,5
5% areia 4		U_{if}	40,3	39,4	38,5	39,4	0,9
		U_{mf}	43,4	41,4	39,9	41,6	1,8
		U_{cf}	46,6	47,6	45,6	46,6	1
5% areia 5		U_{if}	61,1	59,5	57,3	59,3	1,9
		U_{mf}	66,4	63,4	63,9	64,6	1,6
		U_{cf}	76,1	74,6	75,3	75,3	0,8

D.3. Testes fluidodinâmicos variando a altura do leito em misturas binarias compostas por 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura*

D.3.1. Mistura binaria 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura*, *H/D* = 1,5.

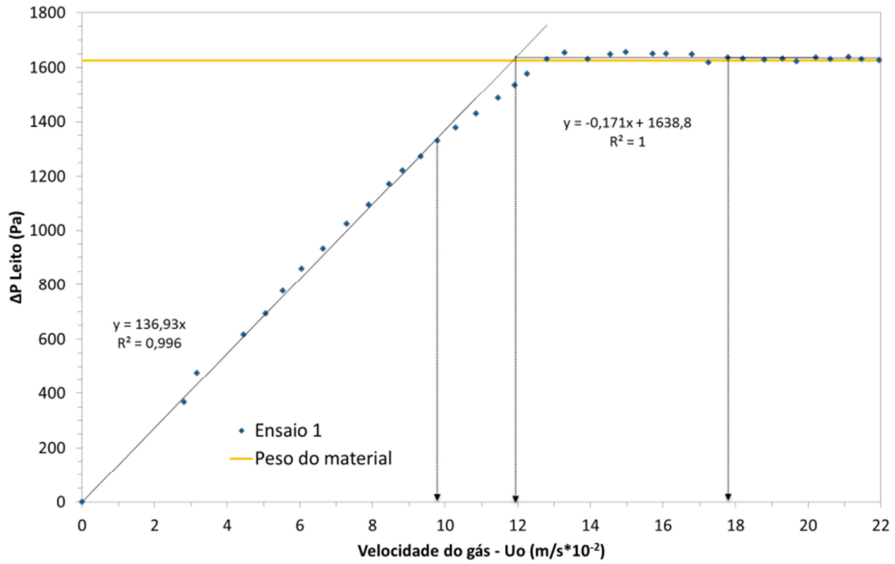


Figura D.41. Ensaio 1.

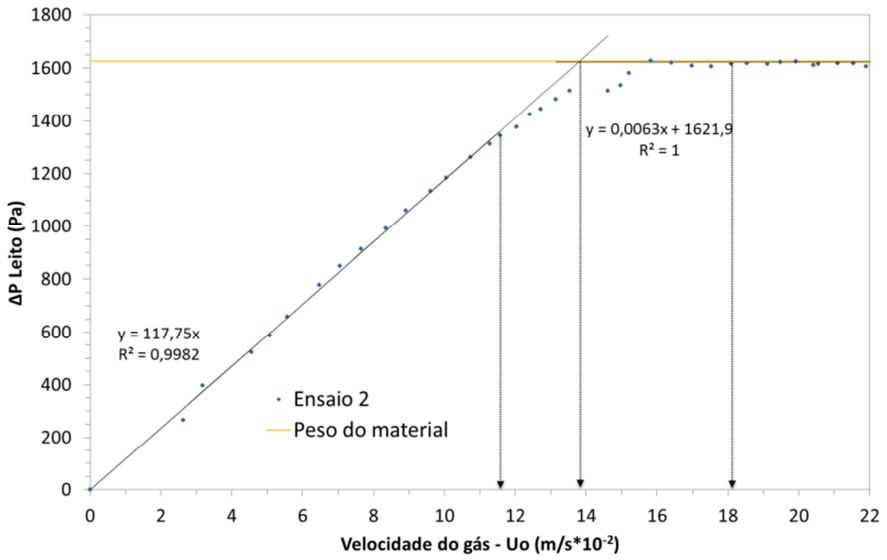


Figura D.42. Ensaio 2.

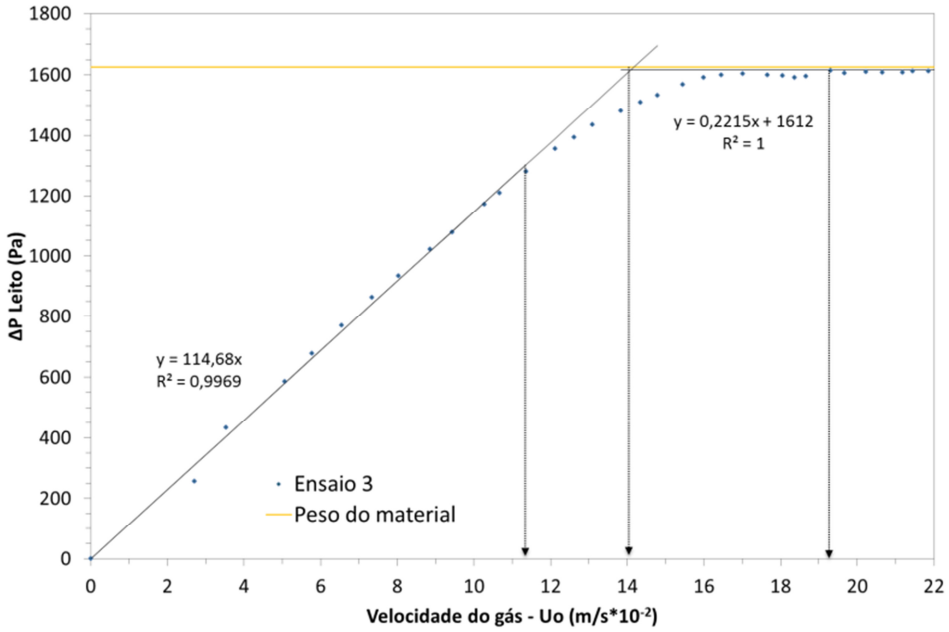


Figura D.43. Ensaio 3.

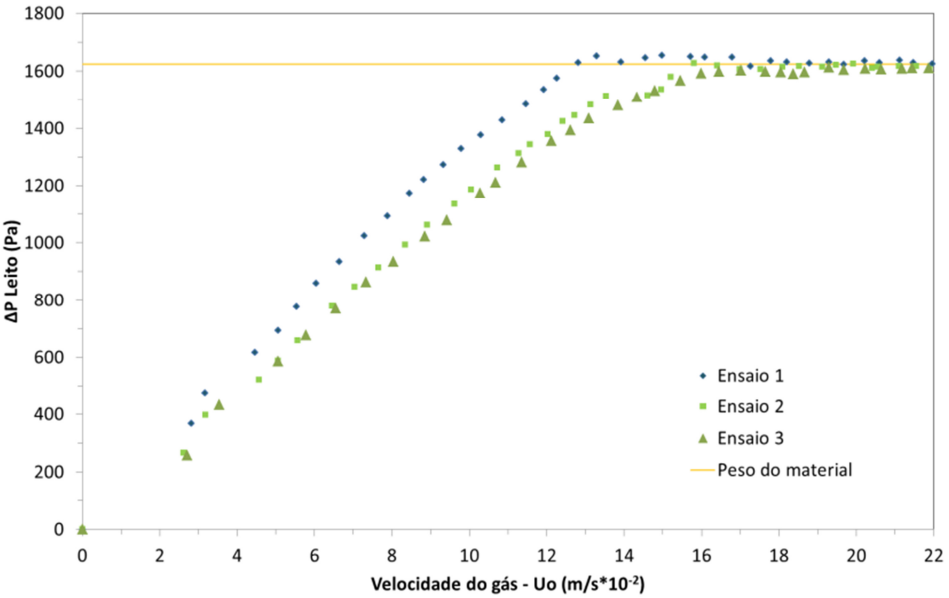


Figura D.44. Ensaios combinados.

D.3.2. Mistura binaria 95% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 460 μm) e 5% de bambu *in natura*, *H/D* = 2

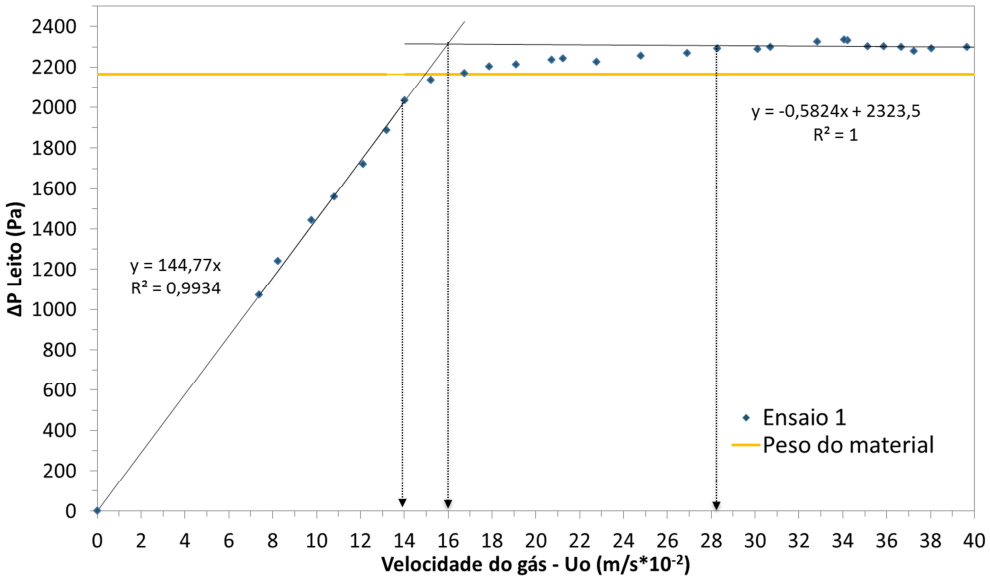


Figura D.45. Ensaio 1.

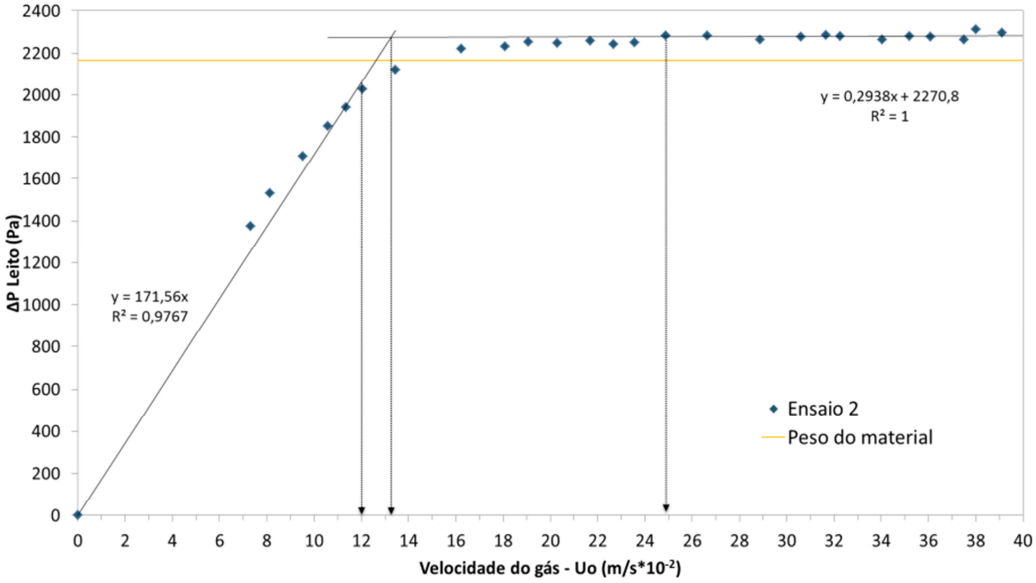


Figura D.46. Ensaio 2.

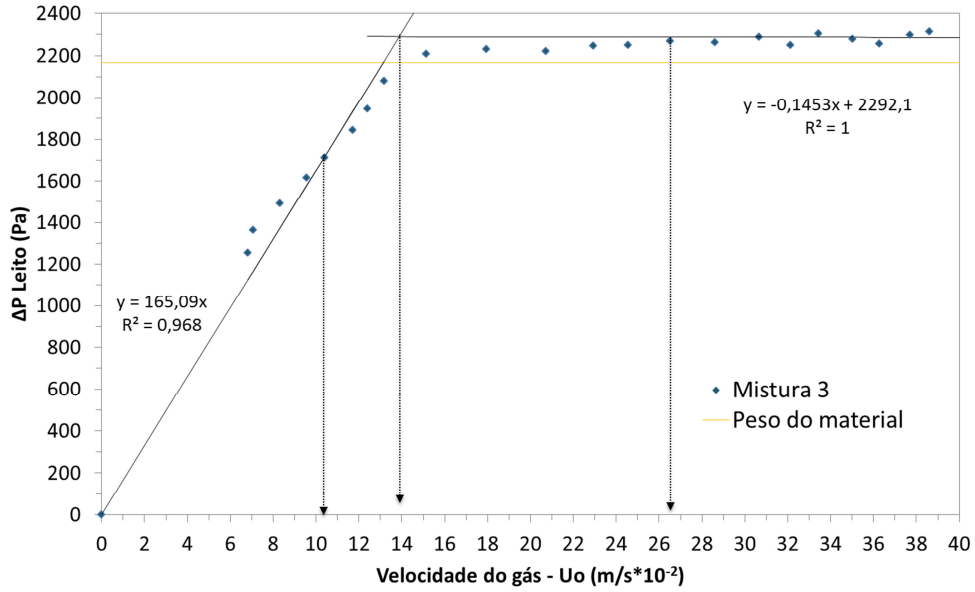


Figura D.47. Ensaio 3.

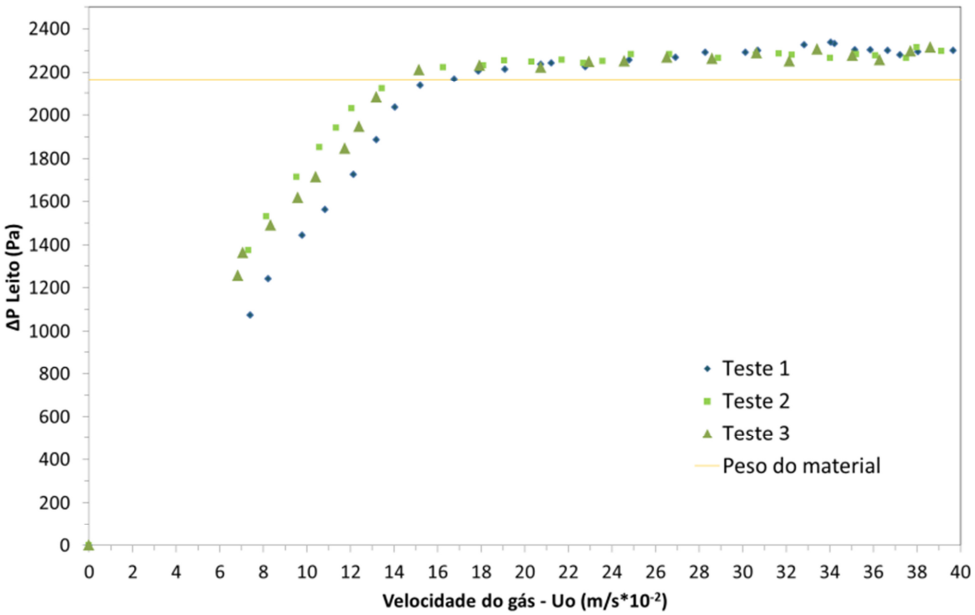


Figura D.48. Ensaios combinados.

Tabela D.3. U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} dos ensaios fluidodinâmicos do leito composto com 95% areia 3 ($\overline{d_p}$ = 460 μm) e 5% *bambu in natura*.

H/D	U	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	$\overline{U}$	$\overline{\Delta U}$
			(10^{-2} m/s)			
1	U_{if}	9,9	10,7	11,2	10,6	0,7
	U_{mf}	12,3	13,3	14,4	13,3	1,1
	U_{cf}	17,9	17	17,6	17,5	0,5
1,5	U_{if}	9,8	11,6	11,4	10,7	1
	U_{mf}	12	13,8	14,08	12,9	1,1
	U_{cf}	17,8	18,1	19,3	18	0,8
2	U_{if}	14	12,1	10,4	12,2	1,8
	U_{mf}	16	13,3	13,9	14,4	1,4
	U_{cf}	28,3	24,9	26,5	26,6	1,7

D.4. Testes fluidodinâmicos variando a composição do leito em misturas binarias compostas por areia-bambu *in natura*, *H/D* = 1

D.4.1. Mistura binaria composta por 97,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 2,5% de bambu *in natura*, *H/D* = 1.

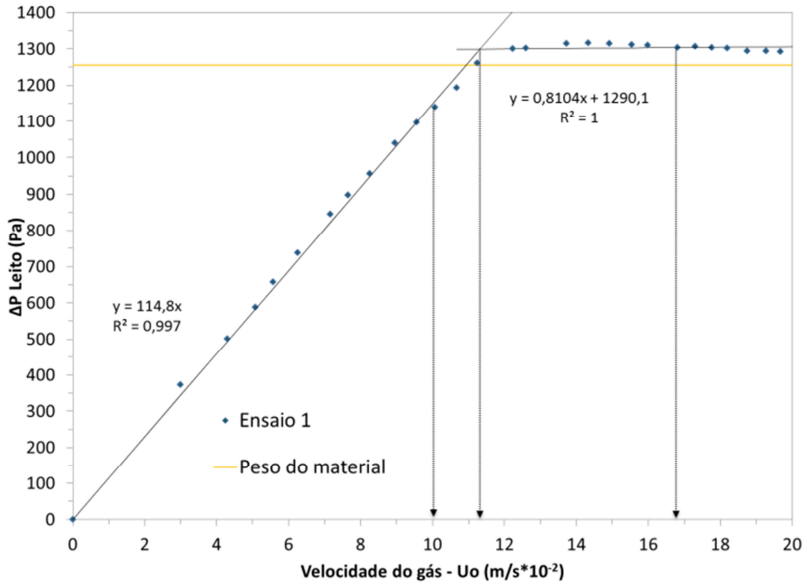


Figura D.49. Ensaio 1.

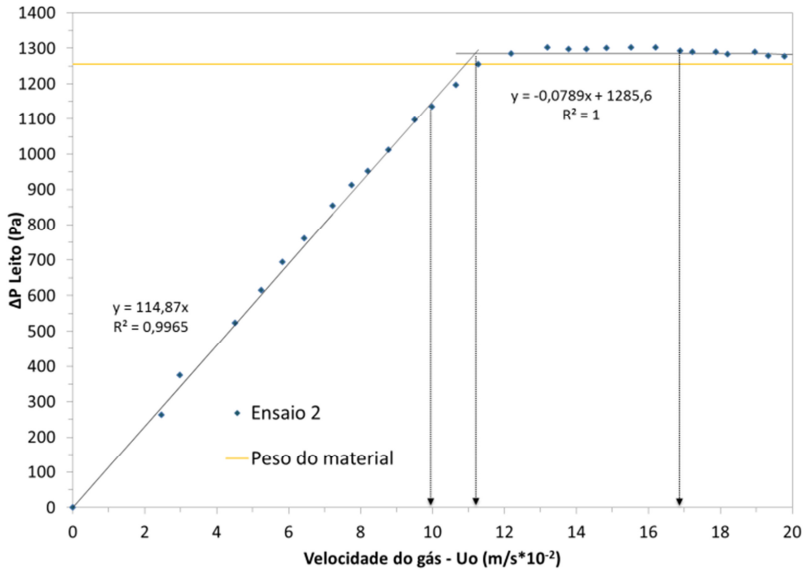


Figura D.50. Ensaio 2.

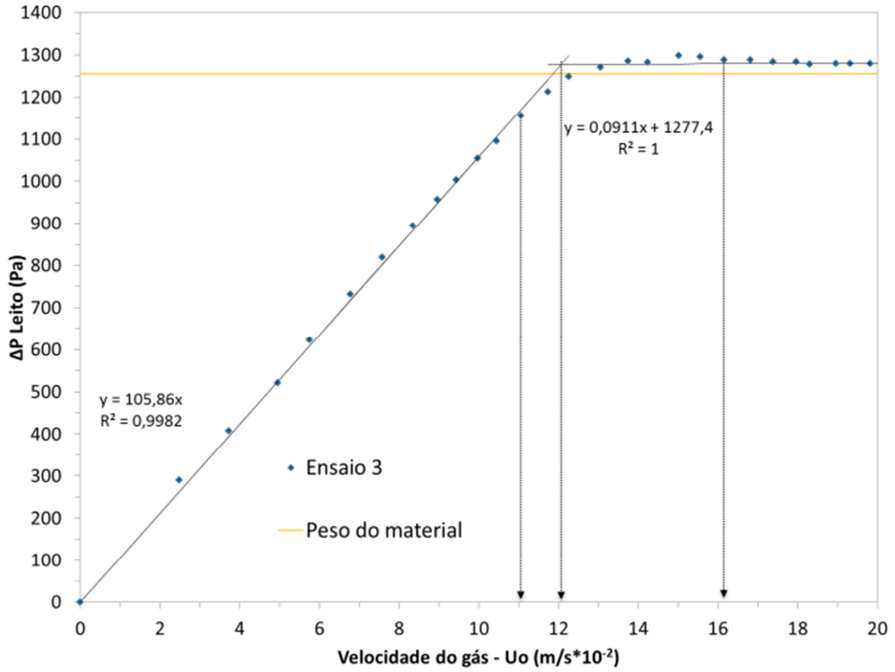


Figura D.51. Ensaio 3.

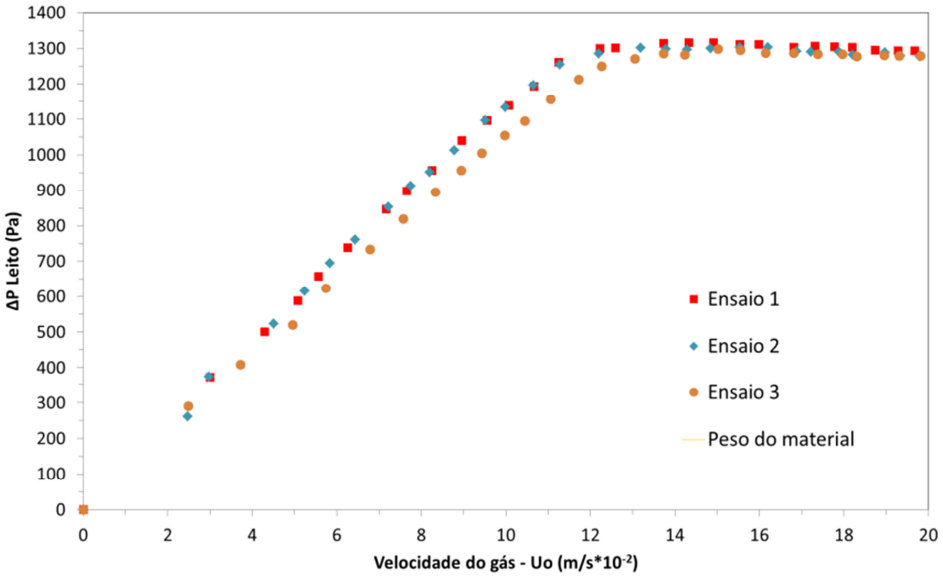


Figura D.52. Ensaios combinados.

D.4.2. Mistura binaria composta por 92,5% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 7,5% de bambu *in natura*, *H/D* = 1.

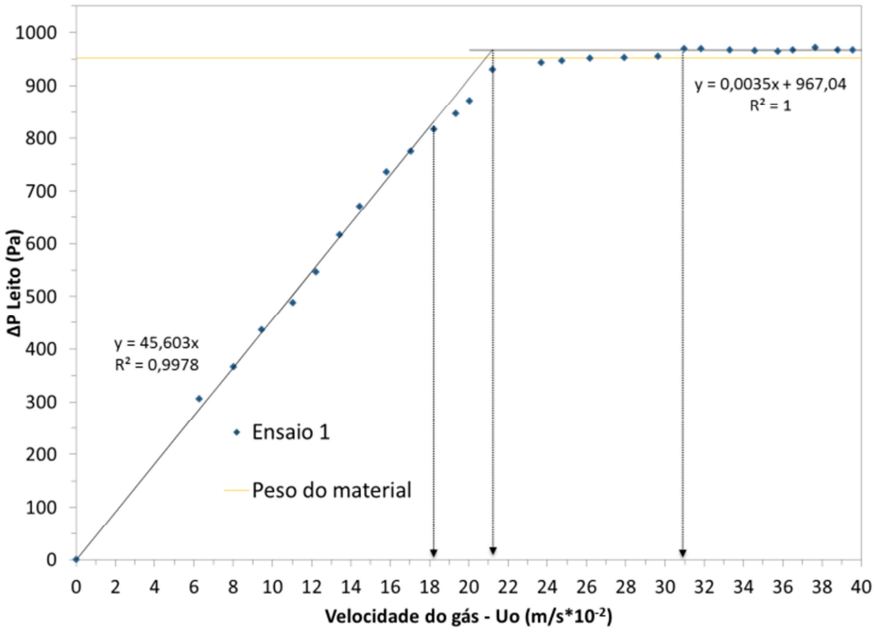


Figura D.53. Ensaio 1.

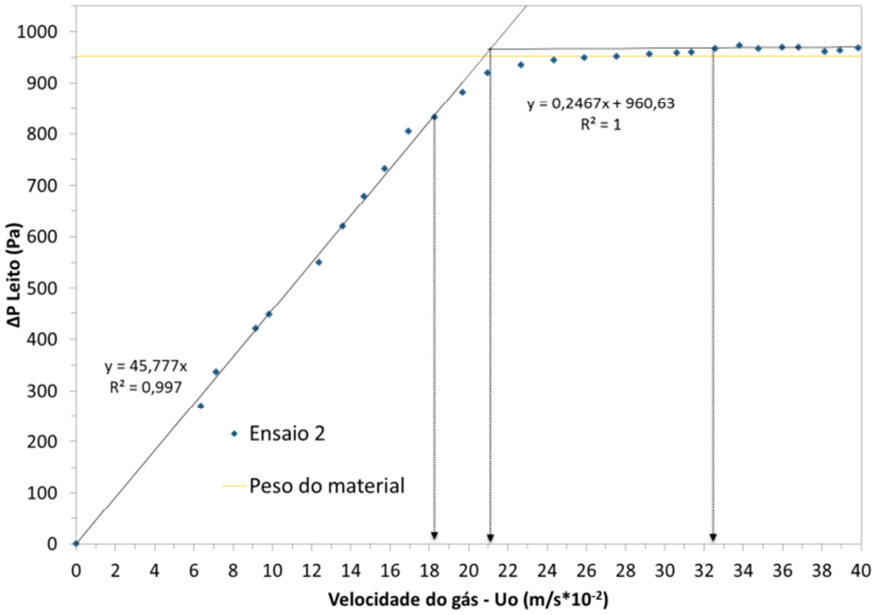


Figura D.54. Ensaio 2.

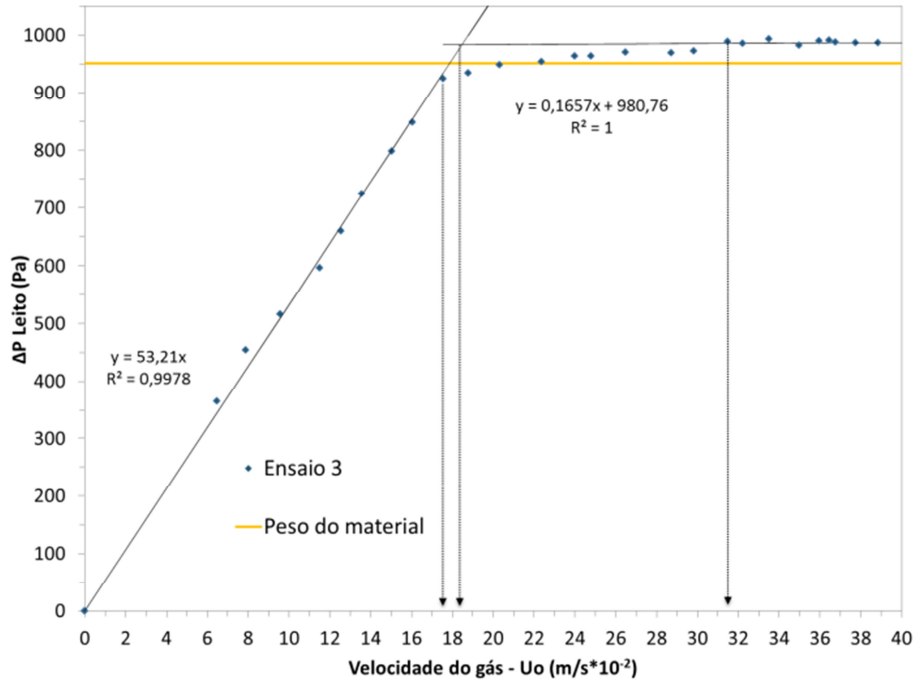


Figura D.55. Ensaio 3.

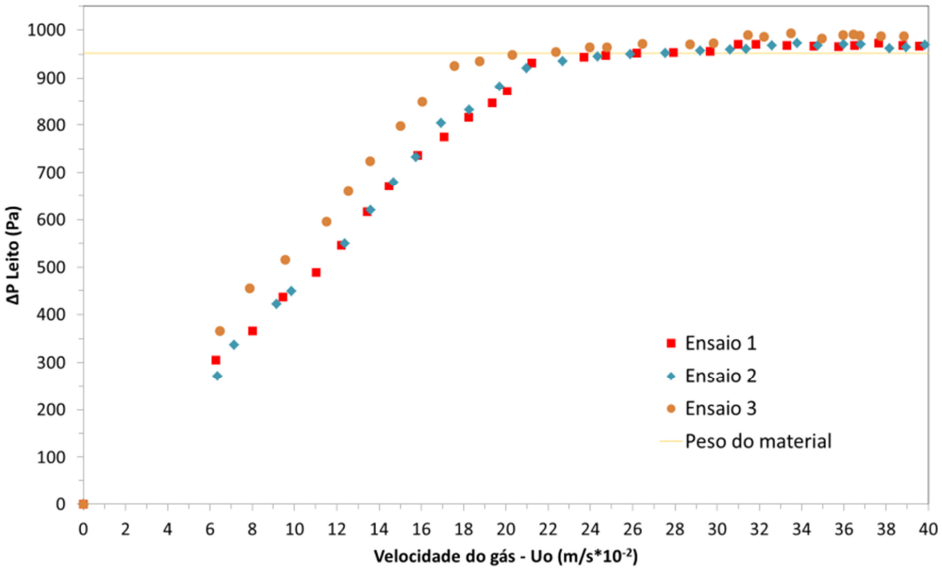


Figura D.56. Ensaios combinados.

D.4.3. Mistura binaria composta por 90% de areia 3 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 10% de bambu *in natura*, *H/D* = 1.

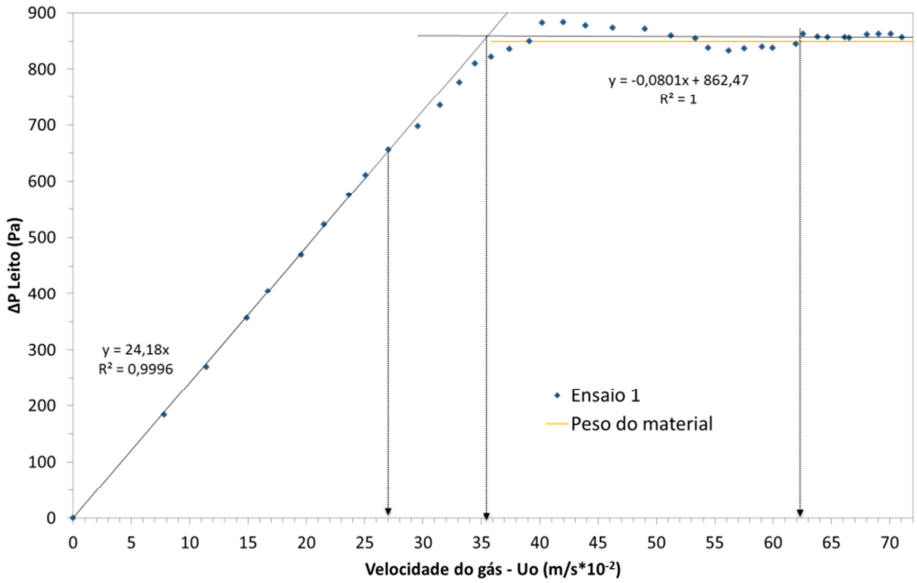


Figura D.57. Ensaio 1.

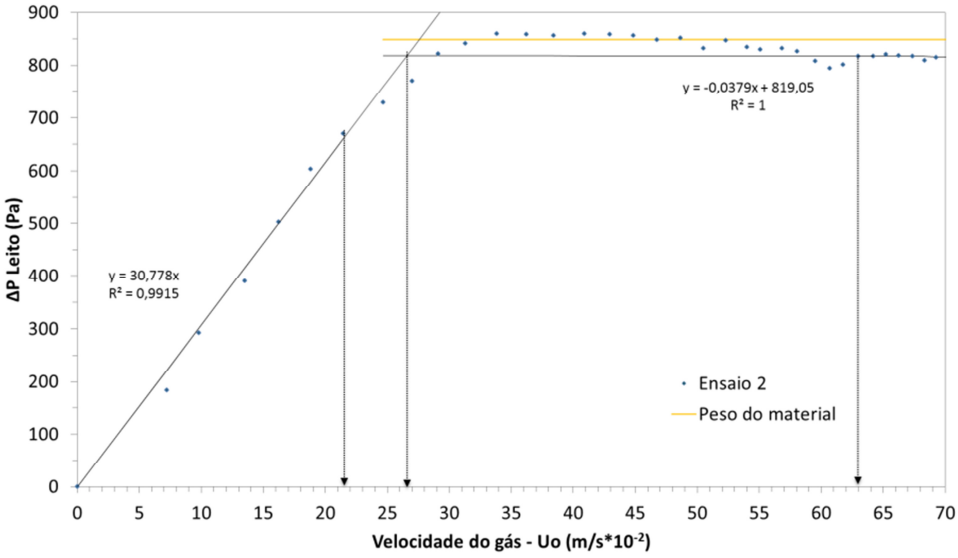


Figura D.58. Ensaio 2.

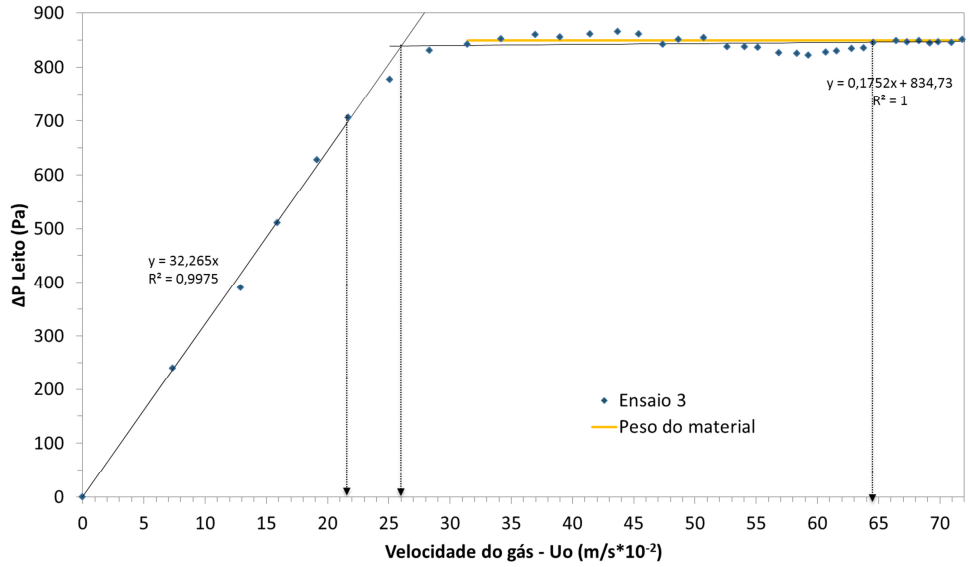


Figura D.59. Ensaio 3.

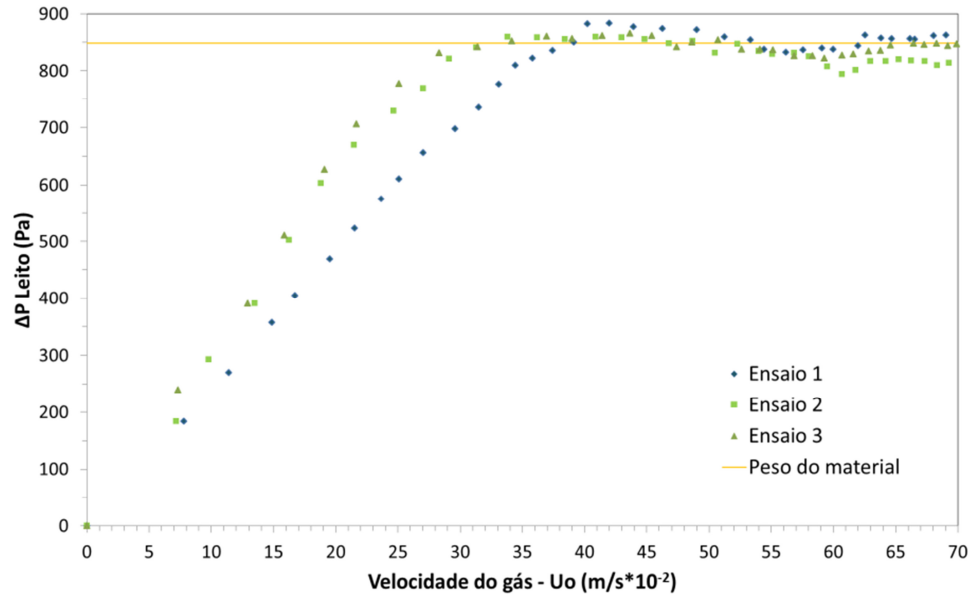


Figura D.60. Ensaios combinados.

Tabela D.4. U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} dos ensaios fluidodinâmicos do leito para diferentes porcentagens de areia e *bambu in natura*, H/D = 1.

Composição de biomassa no leito (%)	U	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	$\overline{U}$	$\overline{\Delta U}$
				(10^{-2} m/s)		
0	U_{if}	-	-	-	-	-
	U_{mf}	10,3	10,5	11,3	10,7	0,5
	U_{cf}	-	-	-	-	-
2,5	U_{if}	10,1	10	11,1	10,4	0,6
	U_{mf}	11,3	11,2	12,1	11,5	0,5
	U_{cf}	16,8	16,9	16,2	16,6	0,4
5	U_{if}	9,9	10,7	11,2	10,6	0,7
	U_{mf}	12,3	13,3	14,4	13,3	1,1
	U_{cf}	17,9	17	17,6	17,5	0,5
7,5	U_{if}	18,2	18,3	17,6	18	0,4
	U_{mf}	21,2	21,1	18,5	20,3	1,5
	U_{cf}	31	32,6	31,5	31,7	0,8
10	U_{if}	27	21,5	21,7	23,4	3,1
	U_{mf}	35,6	26,6	26	29,4	5,4
	U_{cf}	62,6	63	64,6	63,4	1,1

D.5. Testes fluidodinâmicos variando a composição do leito em misturas binarias composta por areia-carvão, H/D = 1

D.5.1. Mistura binaria composta por 97,5% areia 3 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 2,5% de carvão, H/D = 1.

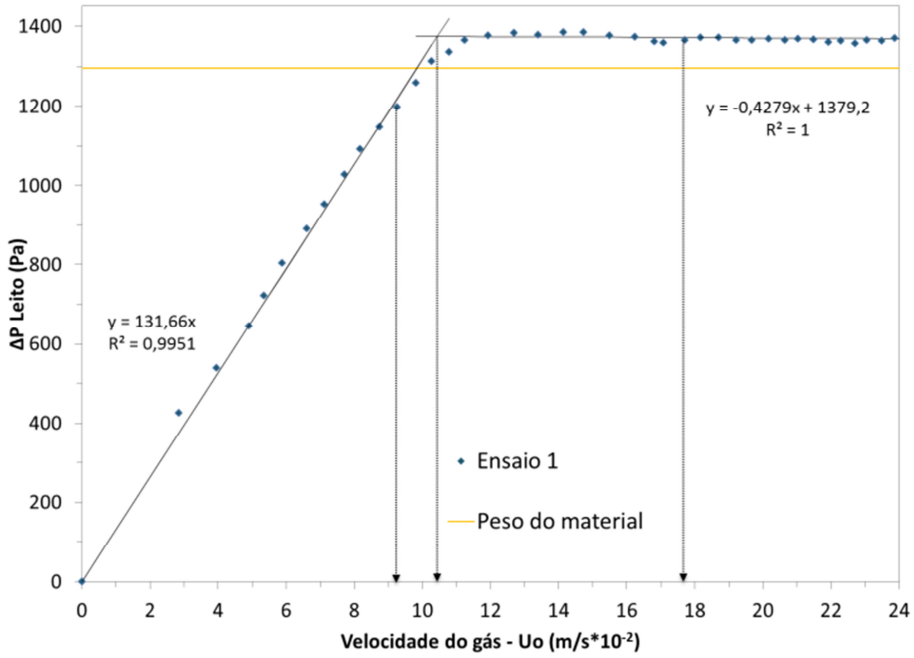


Figura D.61. Ensaio 1.

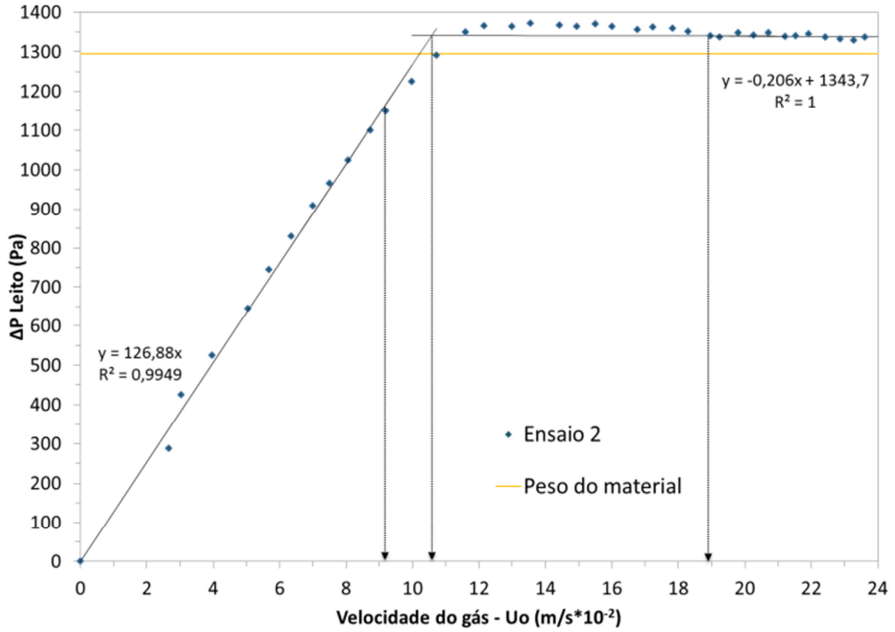


Figura D.62. Ensaio 2.

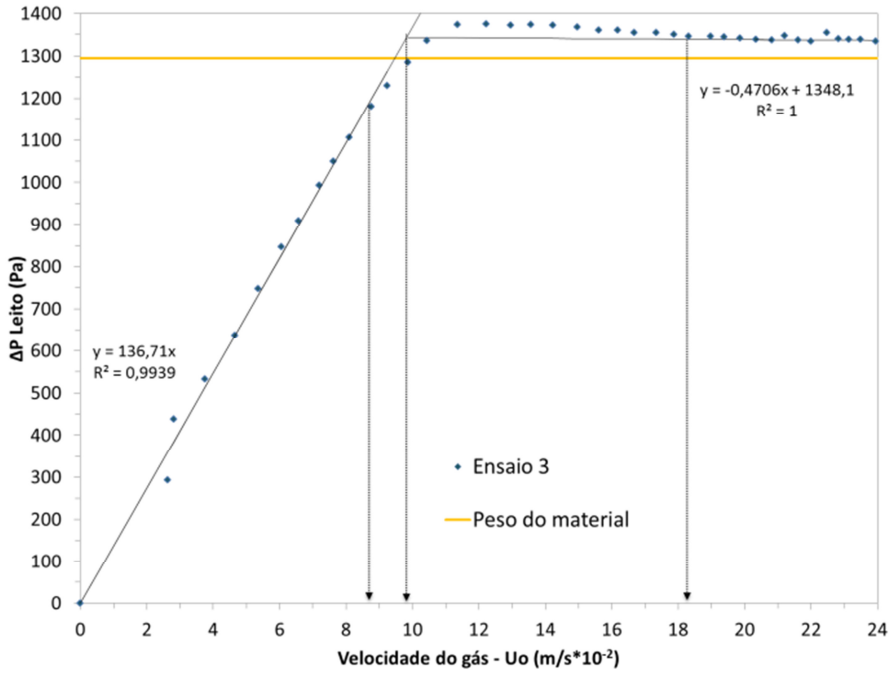


Figura D.63. Ensaio 3.

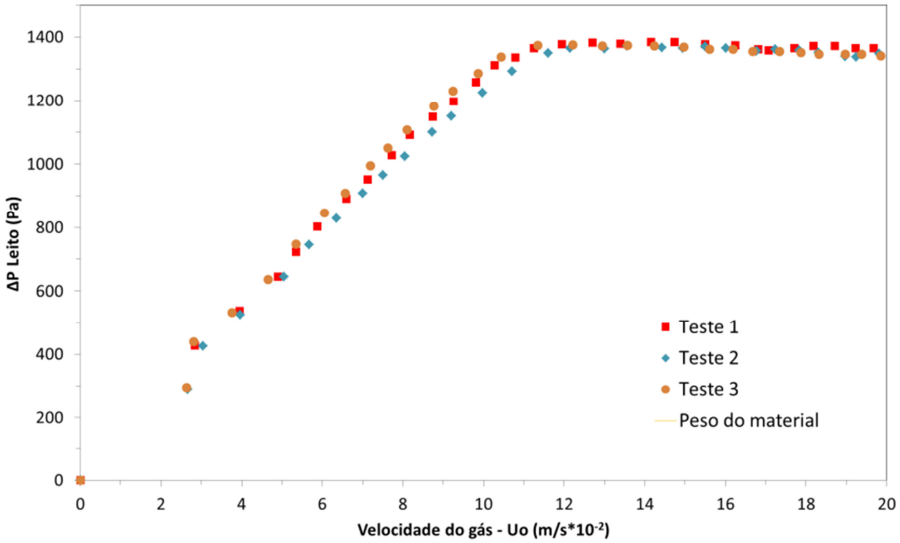


Figura D.64. Ensaios combinados.

D.5.2. Mistura binaria composta por 95% areia 3 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 5% de carvão, H/D = 1.

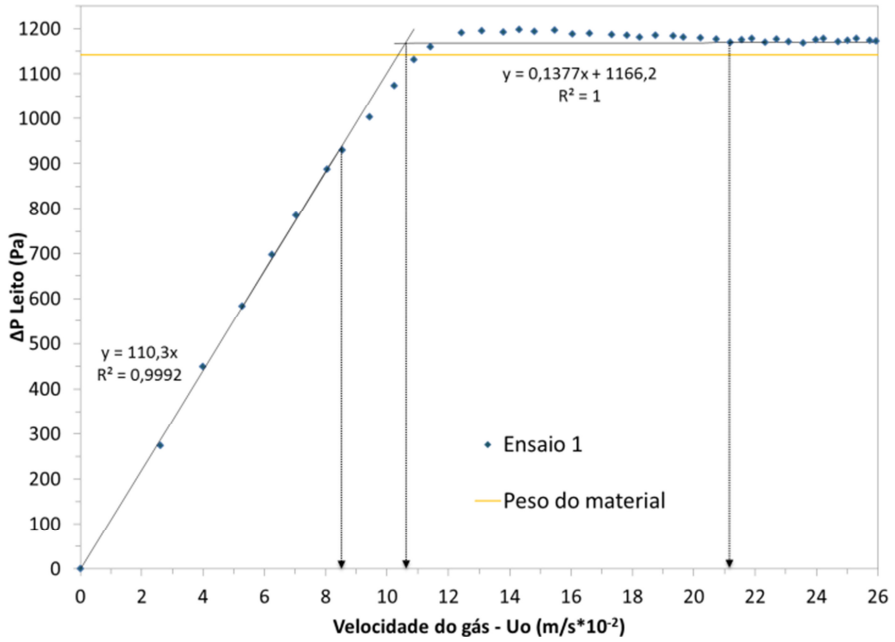


Figura D.65. Ensaio 1.

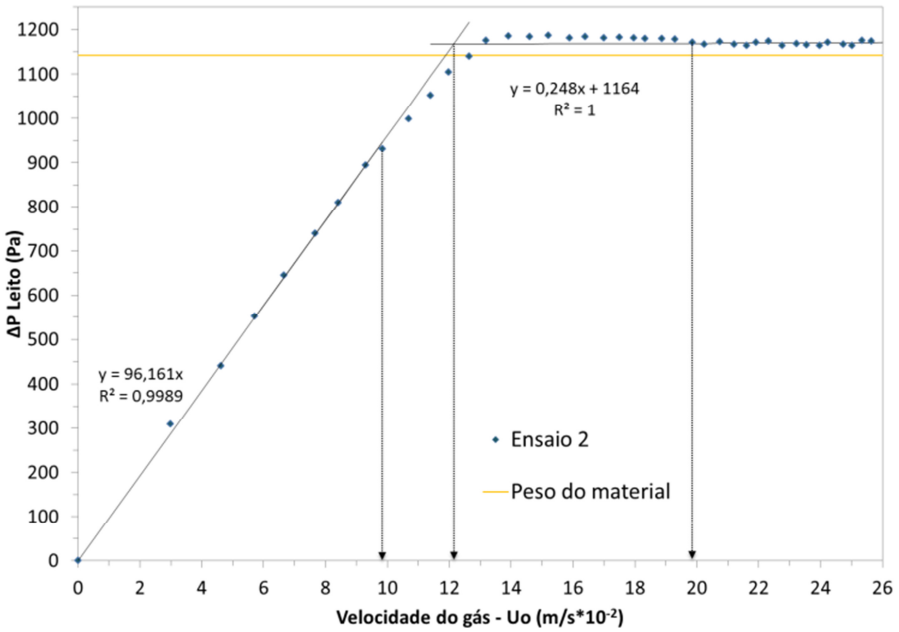


Figura D.66. Ensaio 2.

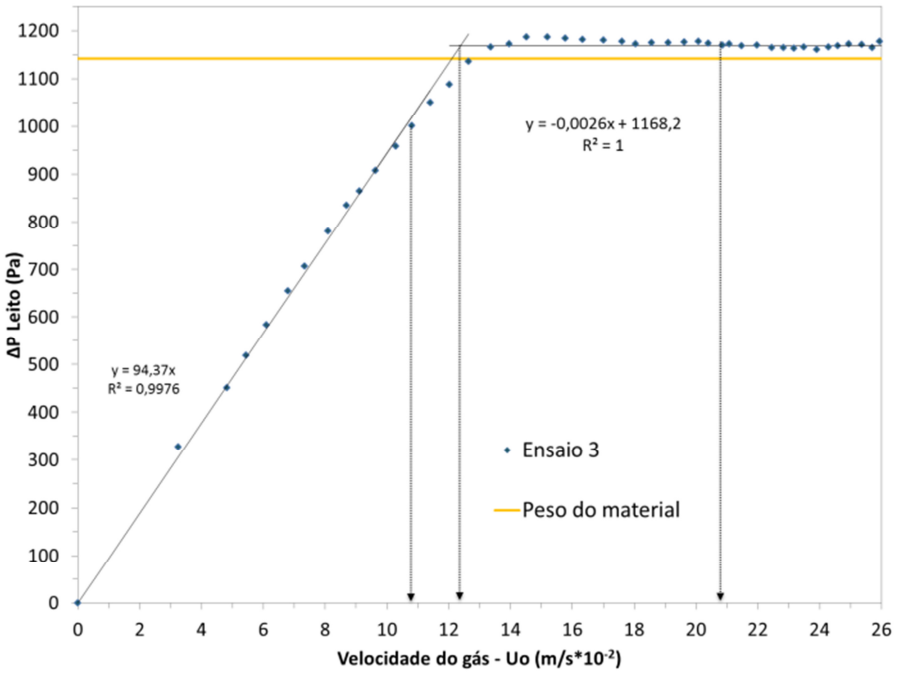


Figura D.67. Ensaio 3.

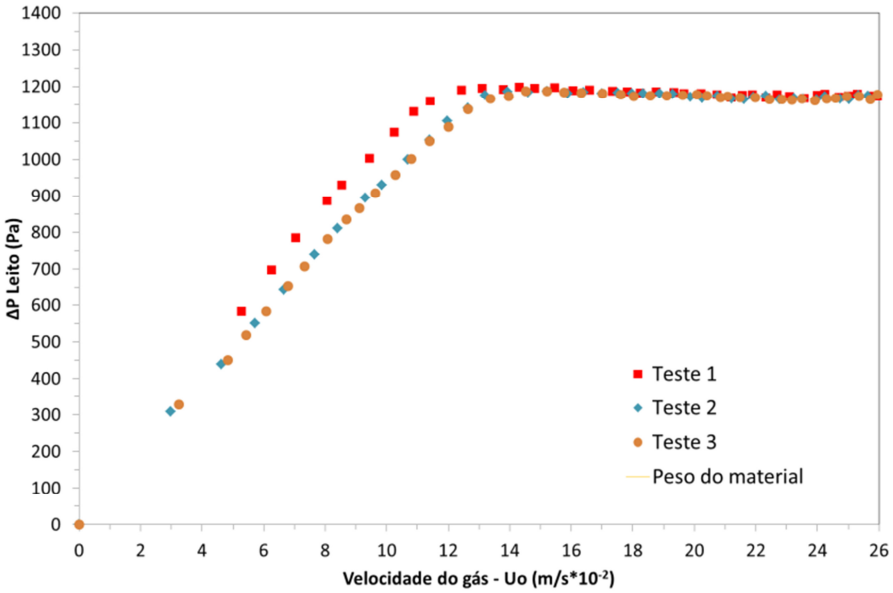


Figura D.68. Ensaios combinados.

D.5.3. Mistura binaria composta por 92,5% areia 3 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 7,5% de carvão, H/D = 1.

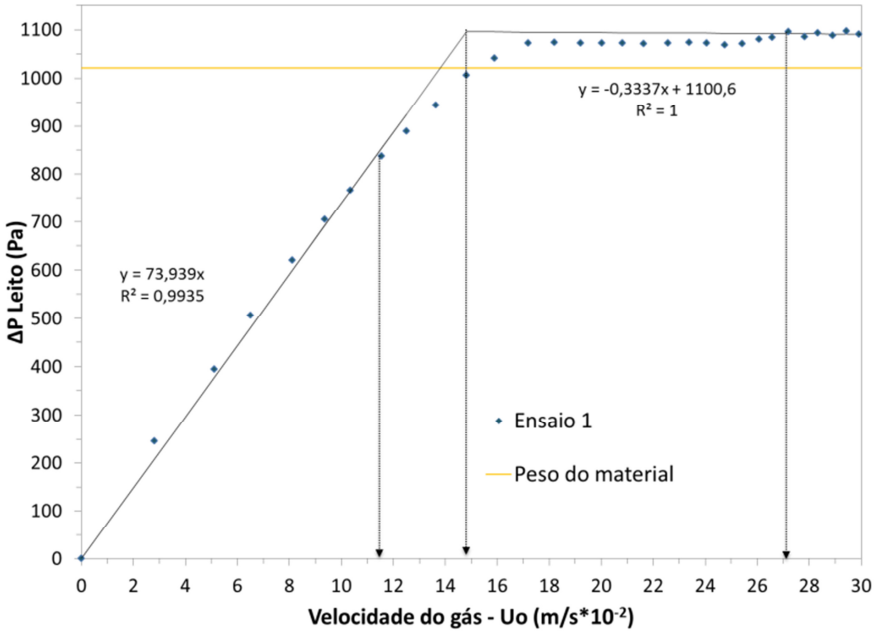


Figura D.69. Ensaio 1.

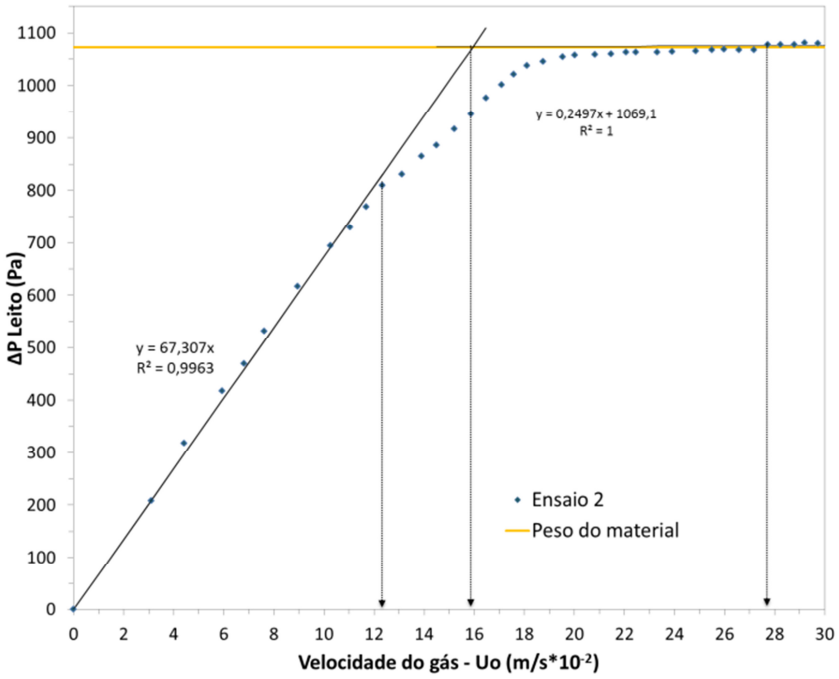


Figura D.70. Ensaio 2.

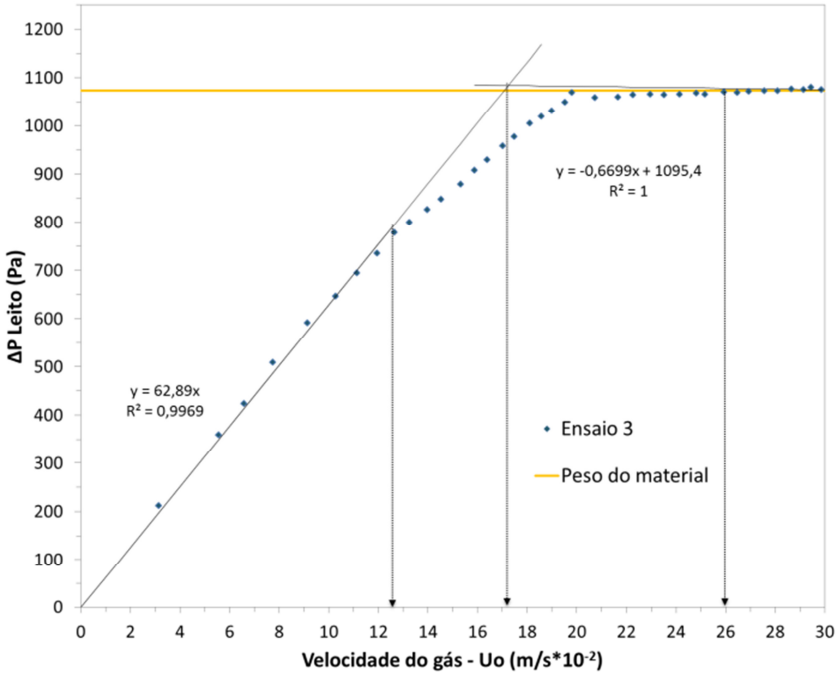


Figura D.71. Ensaio 3.

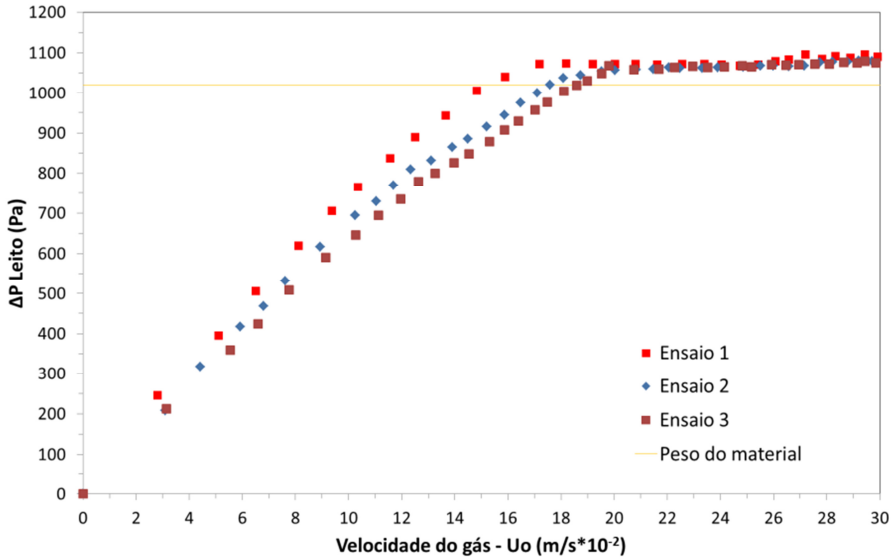


Figura D.72. Ensaios combinados.

D.5.4. Mistura binaria composta por 90% areia 3 ($\overline{dp}$ = 920 μm) e 10% de carvão, H/D = 1.

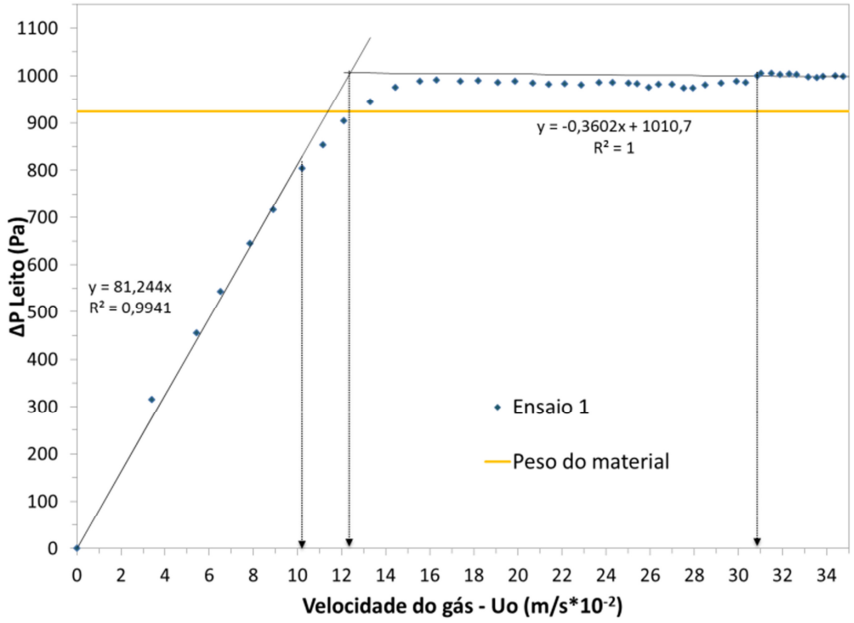


Figura D.73. Ensaio 1.

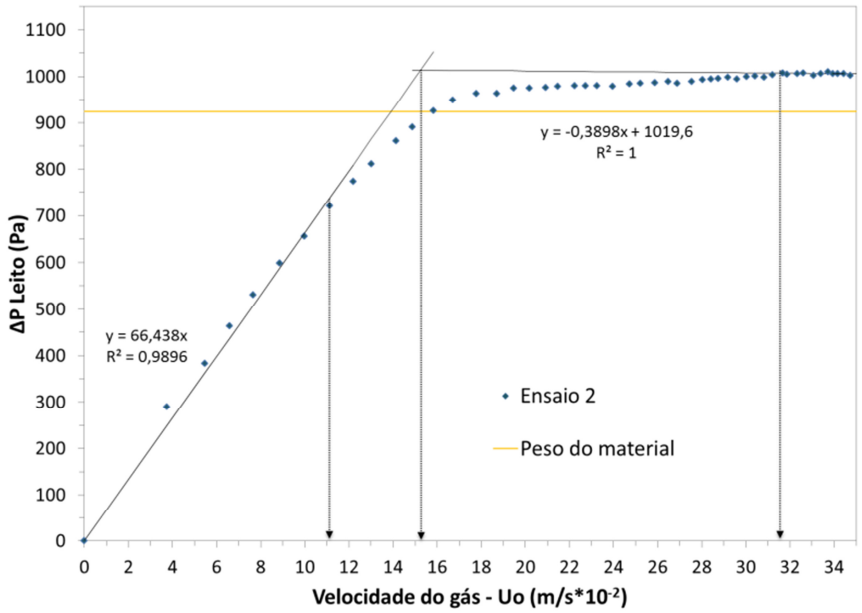


Figura D.74. Ensaio 2.

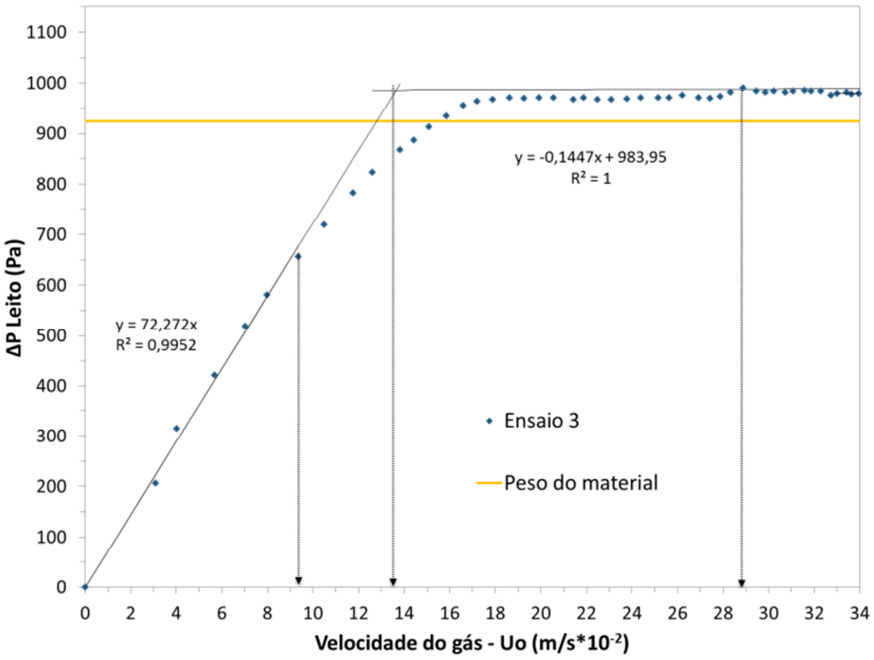


Figura D.75. Ensaio 3.

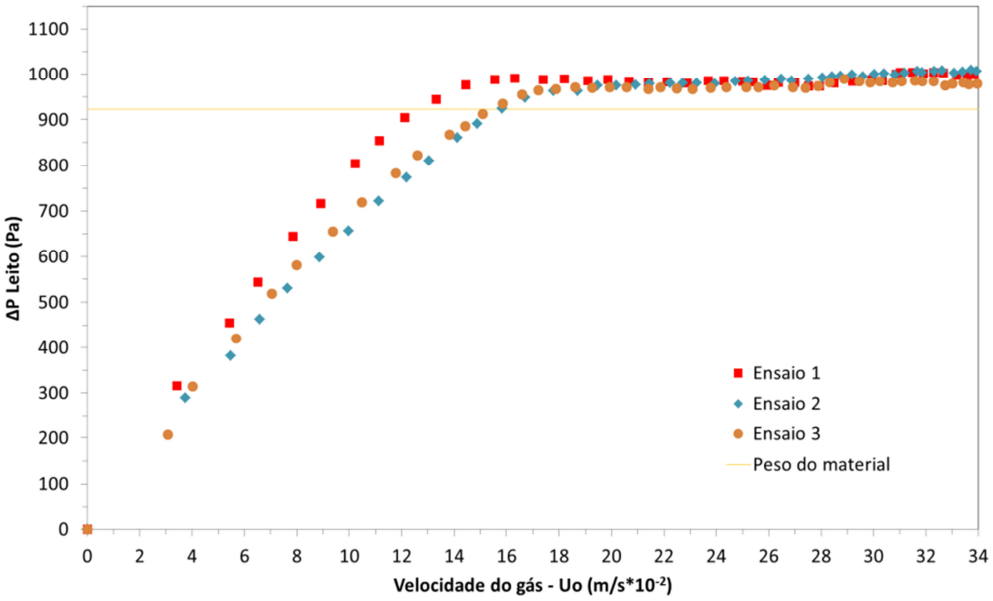


Figura D.76. Ensaios combinados.

Tabela D.5. U_{fi}, U_{mf} e U_{fc} dos ensaios fluidodinâmicos do leito para diferentes porcentagens de areia e *carvão*, *H/D* = 1.

Composição de biomassa no leito (%)	U	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	$\overline{U}$	$\overline{\Delta U}$
			(10^{-2} m/s)			
0	U_{if}	-	-	-	-	-
	U_{mf}	10,3	10,5	11,3	10,7	0,5
	U_{cf}	-	-	-	-	-
2,5	U_{if}	9,3	9,2	8,8	9,1	0,3
	U_{mf}	10,4	10,6	9,8	10,3	0,4
	U_{cf}	17,7	19	18,3	18,3	0,7
5	U_{if}	8,5	9,8	10,8	9,7	1,2
	U_{mf}	11,3	12,1	12,4	11,9	0,6
	U_{cf}	21,2	19,9	20,9	20,7	0,7
7,5	U_{if}	11,6	12,3	12,6	12,2	0,5
	U_{mf}	14,8	15,9	17,2	16	1,2
	U_{cf}	27,2	27,7	25,9	26,9	0,9
10	U_{if}	10,2	11,1	9,4	10,2	0,9
	U_{mf}	14,8	15,3	13,6	14,6	0,9
	U_{cf}	30,9	31,7	28,9	30,5	1,4