

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
NÍVEL MESTRADO

CARACTERIZAÇÃO DA FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSAS DE CASCA DE  
MADEIRAS EM LEITOS POLIDISPERSOS

GUILHERME ALFREDO GENEHR

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo, novembro de 2015

CARACTERIZAÇÃO DA FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSAS DE CASCA  
DE MADEIRAS EM LEITOS POLIDISPERSOS

Guilherme Alfredo Genehr

Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre, pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica (PPGEM) da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Luiza Sperb Indrusiak

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander (UNISINOS / PPGEM)

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes (UNISINOS / PPGEM)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Regina Modolo (UNISINOS / PPGEM)

Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio (UFRGS / PPGEQ)

São Leopoldo, novembro de 2015

G326c

Genehr, Guilherme Alfredo.

Caracterização da fluidização de biomassas de casca de madeiras em leitos polidispersos / Guilherme Alfredo Genehr. – 2015.

93 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

“Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Flávia Schwarz Franceschini Zinani ;  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Luiza Sperb Indrusiak.”

1. Fluidização. 2. Biomassa. 3. Energia – Fontes alternativas.  
I. Título.

CDU 621.6:620.91

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252)

## RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização física de amostras de biomassas e inertes e a caracterização da fluidodinâmica de misturas binárias entre biomassa e areia, através da determinação das curvas de fluidização destas misturas. Como biomassa foram utilizadas casca de eucalipto (*Eucalyptus*) e casca de pinus (*Pinus elliotti*). Os experimentos foram realizados em um leito de bancada desenvolvido na Unisinos com diâmetro interno de 9,4 cm e 1,2 m de comprimento. A amostra de pinus possui um tamanho de partícula médio de 579,13  $\mu\text{m}$  e a amostra de eucalipto um tamanho médio de partícula de 537,50  $\mu\text{m}$  com massas específicas de 1,271  $\text{g}/\text{cm}^3$  e 1,386  $\text{g}/\text{cm}^3$  respectivamente. As misturas foram feitas com proporções entre 1,43% até 41,89% de massa de biomassa. Para os ensaios fluidodinâmicos foram determinadas as velocidades características inicial ( $u_{fi}$ ), aparente ( $u_{fa}$ ) e completa ( $u_{fc}$ ), além da velocidade de mínima fluidização ( $u_{mf}$ ). Os métodos empregados foram o gráfico de queda de pressão em função da velocidade do gás e observações. As análises foram feitas com base na influência da natureza da biomassa, a fração de massa de biomassa contida na mistura e a comparação dos resultados experimentais em relação a correlação proposta na literatura. Os resultados mostraram que com o aumento da proporção de biomassa as velocidades características tendem a aumentar, com exceção das amostras de areia 01 com pinus. A correlação proposta pelos autores Paudel e Feng (2013) apresentou uma boa estimativa para a previsão da velocidade de mínima fluidização de misturas de biomassa e inerte com erros relativos médios absolutos de 12,70%, 31,90%, 140,33% e 19,10% para as misturas de areia 01 com eucalipto, areia 02 com eucalipto, areia 01 com pinus e areia 02 com pinus, respectivamente.

Palavras-chave: Caracterização de biomassa, Fluidização, Escoamento multifásico.

## ABSTRACT

This paper presents the physical characterization of samples of biomass and inert and the characterization of fluid dynamics of binary mixtures of sand and biomass, by determining the fluidization curves from these mixtures. Eucalyptus bark (*Eucalyptus*) and pine bark (*Pinus elliottii*) were used as biomass. The experiments were performed in a bench bed developed at the Unisinos with an internal diameter of 94 cm and 1.2 m in length. The biomass samples have an average particle size of 579.13  $\mu\text{m}$  for pine and 537.50  $\mu\text{m}$  for eucalyptus with specific real mass of 1,271  $\text{g}/\text{cm}^3$  and 1.386  $\text{g}/\text{cm}^3$  respectively. The mixtures were prepared with proportions between 1.43% to 41.89% by weight of biomass. The initial ( $u_{fi}$ ), the apparent ( $u_{fa}$ ), the complete ( $u_{fc}$ ), and the minimum fluidization velocity ( $u_{mf}$ ) were determined for fluid dynamic tests. The methods employed were the pressure drop graph as a function of gas velocity and observations. The analyzes have been performed concerning the influence of the nature of the biomass, the mass fraction of biomass contained in the mixture and comparison of the experimental results regarding the correlation proposed in the literature. The results showed that with the increase of the proportion of biomass characteristics speeds tend to increase, with the exception of the sand 01 with pine mixtures. The correlation proposed by the authors Paudel and Feng (2013) presented a good estimate for the prediction of the minimum fluidization velocity of mixtures of biomass and inert with absolute average relative errors of 12.70%, 31.90%, 140.33% and 19.10% for mixtures of sand 01 with eucalyptus, sand 02 with eucalyptus, sand 01 with pine and sand 02 with pine respectively.

Keywords: Biomass characterization, fluidization, Multiphase flow

## LISTA DE ABREVIATURAS

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITT FOSSIL	Instituto Tecnológico de Micropaleontologia
LCVMAT	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais
LFC	Leito Fluidizante Circulante
MDP	<i>Medium density particles</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Nomenclatura*

$A$	área de seção interna do leito [m <sup>2</sup> ]
$Ar$	número de Arquimedes
$D$	diâmetro interno do leito [m]
$d_{1,2,3,\dots}$	diâmetros dos componentes 1,2,3,... [m]
$d_{ec}$	diâmetro circunscrito em uma partícula de formato irregular [m]
$d_{ei}$	diâmetro inscrito em uma partícula de formato irregular [m]
$\bar{d}_m$	tamanho médio das partículas da mistura [m]
$\bar{d}_p$	diâmetro de Sauter [m]
$d_p$	diâmetro médio das partículas [m]
$\bar{d}_{pi}$	diâmetro médio entre as peneiras [m]
$d_{pi}$	diâmetro da peneira [m]
$d_{pi+1}$	diâmetro da peneira posterior [m]
$g$	aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$H$	altura do material no leito [m]
$H_{1,2,3,\dots}$	altura medida do leito [m]
$H_m$	altura média do leito [m]
$L_{mf}$	altura do leito nas condições de mínima fluidização [m]
$m_a$	massa da amostra [kg]
$m_b$	massa de biomassa [kg]
$m_i$	massa de inerte [kg]
$m_p$	massa do particulado [kg]
$PF$	perda ao fogo
$PCI$	poder calorífico inferior [J/kg]
$PCS$	poder calorífico superior [J/kg]
$Q$	vazão de gás [m <sup>3</sup> /s]
$Re_{mf}$	Reynolds nas condições de mínima fluidização
$u_0$	velocidade do gás dentro do leito [m/s]
$u_e$	velocidade de mínima fluidização para os componentes emergentes [m/s]
$u_i$	velocidade de mínima fluidização para os componentes imergentes [m/s]
$u_{mf}$	velocidade de mínima fluidização [m/s]
$u_{fa}$	velocidade de fluidização aparente [m/s]

$u_{fc}$	velocidade de fluidização completa [m/s]
$u_{mf,e}$	velocidade de mínima fluidização experimental [m/s]
$u_{mf,E}$	velocidade de mínima fluidização dos componentes emergentes [m/s]
$u_{fi}$	velocidade de fluidização inicial [m/s]
$u_{mf,I}$	velocidade de mínima fluidização dos componentes imergentes [m/s]
$u_{mf,M}$	velocidade de mínima fluidização mistura completamente misturada [m/s]
$u_{mf,MS}$	velocidade de mínima fluidização mistura parcialmente misturada [m/s]
$u_{mf,S}$	velocidade de mínima fluidização mistura completamente segregada [m/s]
$u_{mf,t}$	velocidade de mínima fluidização teórica [m/s]
$V_a$	volume ocupado pela amostra [m <sup>3</sup> ]
$V_p$	volume ocupado pelo particulado [m <sup>3</sup> ]
$V_T$	volume total de material no leito [m <sup>3</sup> ]
$x_{1,2,3,...}$	frações mássicas na mistura dos componentes 1, 2, 3,....
$x_i$	fração mássica do componente
$x_{im}$	fração mássica do componente imersível na mistura

### *Símbolos Gregos*

$\Delta p_b$	queda de pressão através do leito [Pa]
$\epsilon_0$	porosidade inicial do leito
$\epsilon_{mf}$	porosidade do leito nas condições de mínima fluidização
$\mu$	viscosidade do fluido [N s/m <sup>2</sup> ]
$\rho_{1,2,3,...}$	massas específicas dos componentes 1, 2, 3,.... [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	massa específica do gás [kg/m <sup>3</sup> ]
$\bar{\rho}_m$	massa específica média da mistura [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	massa específica real [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ap}$	massa específica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{apa}$	massa específica aparente da areia [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{apb}$	massa específica aparente da biomassa [kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi_a$	esfericidade das partículas de areia
$\phi_s$	esfericidade das partículas



$\chi_b$	fração mássica de biomassa
$\chi_i$	fração mássica do componente inerte
$\chi_{be}$	fração mássica de eucalipto
$\chi_{bp}$	fração mássica de pinus

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regimes de fluidização .....	16
Figura 2 – Curva de fluidização .....	16
Figura 3 – Classificação de Geldart.....	18
Figura 4 – Queda de pressão versus velocidade de fluidização. ....	19
Figura 5 – Estados de segregação de uma mistura binária.....	23
Figura 6 – Curvas de fluidização.....	24
Figura 7 – Velocidade de mínima fluidização da madeira de móveis.....	28
Figura 8 – Comportamento da fluidização das amostras de biomassa.....	29
Figura 9 – Relação entre $Re_{mf}$ e $Ar$ para material inerte.....	31
Figura 10 – Relação entre $Re_{mf}$ e $Ar$ para biomassas.....	32
Figura 11 – Relação entre $Re_{mf}$ e $Ar$ para misturas de inerte com biomassas de diversas proporções.....	34
Figura 12 – Velocidades de mínima fluidização teórica e experimental para misturas de biomassa (espiga de milho) e areia.....	35
Figura 13 – Diâmetros inscrito e circunscrito em uma partícula irregular.....	38
Figura 14 – Estoque de toras de Eucalipto .....	39
Figura 15 – Estoque de toras de Pinus.....	39
Figura 16 – Estoque de biomassa para combustão .....	40
Figura 17 – Amostras de areia.....	40
Figura 18 – Casca de eucalipto moída.....	41
Figura 19 – Casca de pinus moída.....	41
Figura 20 – Moinho SEIBT MGHS 270 A .....	42
Figura 21 – Tela utilizada para análise do eucalipto .....	44
Figura 22 – Picnômetro AccuPyc II 1340 .....	45
Figura 23 – Medição da altura inicial do leito.....	45
Figura 24 – Amostra de areia 01 observada no MEV .....	46
Figura 25 – Imagem convertida para binária.....	47
Figura 26 – Polígonos formados a partir da imagem binária .....	48
Figura 27 – Equipamento de fluidização de bancada.....	50
Figura 28 – Esferas de vidro para formar o distribuidor do leito .....	51
Figura 29 – Tomada de pressão no leito.....	52
Figura 30 – Curva de fluidização/defluidização característica de particulado homogêneo .....	56
Figura 31 – Dados de queda de pressão do leito a vazio.....	57
Figura 32 – Curva final de queda de pressão do leito a vazio.....	58
Figura 33 – Distribuição granulométrica da areia 01 .....	60
Figura 34 – Distribuição granulométrica da areia 02 .....	60
Figura 35 – Distribuição granulométrica do pinus .....	61
Figura 36 – Partículas de eucalipto .....	62
Figura 37 – Partículas de eucalipto observadas no MEV .....	62
Figura 38 – Partículas de pinus .....	63
Figura 39 – Partículas de pinus observadas no MEV .....	63
Figura 40 – Curva de fluidização da areia 01 .....	64
Figura 41 – Curva de defluidização da areia 01 .....	65
Figura 42 – Curva de fluidização da areia 02.....	65

Figura 43 - Curva de defluidização da areia 02.....	66
Figura 44 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e eucalipto com concentração de 20% do volume de biomassa. ....	67
Figura 45 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e eucalipto com concentrações de 30% e 40% do volume de biomassa.....	68
Figura 46 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 02 e eucalipto com concentrações de 20% e 30% do volume de biomassa.....	69
Figura 47 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 02 e eucalipto com concentração de 40% do volume de biomassa. ....	70
Figura 48 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e pinus com concentração de 20% do volume de biomassa. ....	70
Figura 49 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e pinus com concentrações de 30%, 40% e 60% do volume de biomassa. ....	71
Figura 50 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 02 e pinus com concentrações de 20%, 30%, 40% e 60% do volume de biomassa. ....	72
Figura 53 – Canais preferenciais criados no leito.....	74
Figura 54 – Mistura A02.20P .....	75
Figura 55 – Mistura A02.60P .....	75
Figura 54 – Velocidade de mínima fluidização em função da fração de eucalipto.....	76
Figura 55 – Velocidade de mínima fluidização em função da fração de pinus.....	76
Figura 56 – Evolução das velocidades características das misturas de areia01/eucalipto.....	77
Figura 57 – Evolução das velocidades características das misturas de areia02/eucalipto.....	77
Figura 58 – Evolução das velocidades caracterísitcas das misturas de areia01/pinus.....	78
Figura 59 – Evolução das velocidades características das misturas de areia02/pinus.....	78
Figura 60 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia01/eucalipto .....	79
Figura 61 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia02/eucalipto .....	80
Figura 62 – Bolsas de ar em meio ao leito .....	80
Figura 63 – Bolsas de ar em meio ao leito .....	80
Figura 64 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia01/pinus .....	81
Figura 65 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia02/pinus .....	81
Figura 66 – Comparação entre $u_{mf}$ teórica e experimental (areia01/eucalipto).....	83
Figura 67 – Comparação entre $u_{mf}$ teórica e experimental (areia02/eucalipto).....	83
Figura 68 – Comparação entre $u_{mf}$ teórica e experimental (areia01/pinus).....	84
Figura 69 – Comparação entre $u_{mf}$ teórica e experimental (areia02/pinus).....	84
Figura 70 – Amostras em resfriamento na análise de perda ao fogo.....	93
Figura 71 – Calorímetro Ika C 200.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das constantes $K_1$ e $K_2$ por diversos autores.....	22
Tabela 2 – Distribuição granulométrica das amostras (% em massa).....	27
Tabela 3 – Comparativo entre as constantes $K_1$ e $K_2$ .....	28
Tabela 4 – Propriedades dos particulados .....	30
Tabela 5 – Tipos de biomassa e diâmetro de leito.....	32
Tabela 6 – Dados dos experimentos com misturas de biomassa com inerte.....	33
Tabela 7 – Diferentes definições para diâmetro equivalente de partículas .....	37
Tabela 8 – Padrão das peneiras utilizadas .....	42
Tabela 9 – Dimensões de leitos fluidizados utilizados por diversos autores.....	49
Tabela 10 – Composição das misturas de areia 01 e eucalipto .....	53
Tabela 11 – Composição das misturas de areia 01 e pinus .....	53
Tabela 12 – Composição das misturas de areia 02 e eucalipto .....	54
Tabela 13 – Composição das misturas de areia 02 e pinus .....	54
Tabela 14 – Altura do leito para cada vazão de gás .....	55
Tabela 15 – Características das amostras .....	59
Tabela 16 – Dimensões das aberturas da tela.....	59
Tabela 17 - Velocidades características para misturas com areia 01 .....	73
Tabela 18 – Velocidades características para misturas com areia 02.....	73
Tabela 19 – Comparativo entre $Re_{mf}$ teórico e experimental .....	82
Tabela 20 – Diferenças entre as propriedades das biomassas deste trabalho em relação ao trabalho de Paudel e Feng (2013).....	82
Tabela 21 – Perda ao fogo das biomassas .....	94
Tabela 22 – Poder calorífico superior das biomassas.....	95

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	OBJETIVOS .....	14
1.1.1	Objetivos Específicos .....	14
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
2	FLUIDIZAÇÃO .....	15
2.1	FLUIDIZAÇÃO DE PARTÍCULAS HOMOGÊNEAS .....	15
2.1.1	Regimes de fluidização .....	15
2.1.1.1	Leito fixo .....	17
2.1.1.2	Leito borbulhante .....	17
2.1.1.3	Leito turbulento .....	17
2.1.1.4	Fluidização rápida .....	17
2.1.1.5	Transporte pneumático .....	18
2.1.2	Classificação de Geldart para sólidos particulados .....	18
2.1.3	Velocidade teórica de mínima fluidização .....	19
2.2	FLUIDIZAÇÃO DE MISTURAS HETEROGÊNEAS .....	22
2.3	CARACTERIZAÇÃO DAS FASES SÓLIDAS .....	35
2.3.1	Massa específica real .....	36
2.3.2	Massa específica aparente .....	36
2.3.3	Tamanho das partículas .....	36
2.3.4	Formato .....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	39
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE BIOMASSAS E INERTES .....	39
3.1.1	Preparação das amostras .....	41
3.1.2	Tamanho médio das partículas .....	42
3.1.3	Massa específica real .....	44
3.1.4	Massa específica aparente .....	45
3.1.5	Esfericidade das partículas .....	46
3.2	BANCADA DE FLUIDIZAÇÃO .....	49
3.2.1	Medição de vazão e velocidade do ar .....	51
3.2.2	Medição de pressão diferencial .....	51
3.2.3	Sistema de aquisição de dados .....	52
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	52

3.3.1	Avaliação das misturas binárias .....	53
3.3.2	Determinação da curva de fluidização e expansão do leito .....	54
3.3.3	Determinação das velocidades características.....	56
3.3.4	Determinação da curva de queda de pressão do sistema a vazio .....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS COMPONENTES .....	59
4.2	ANÁLISE FLUIDODINÂMICA .....	64
4.2.1	Curvas de fluidização e defluidização das areias .....	64
4.2.2	Curvas de fluidização e defluidização das misturas.....	66
4.2.2.1	Curvas das misturas de eucalipto com areia.....	66
4.2.2.2	Curvas das misturas de pinus com areia.....	70
4.2.3	Influência da natureza da biomassa na fluidização .....	74
4.2.4	Influência da fração de biomassa nas misturas .....	75
4.2.5	Evolução da porosidade aparente e completa das misturas.....	79
4.3	COMPARATIVO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA.....	81
5	CONCLUSÃO.....	85
5.1	EM RELAÇÃO A CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	85
5.2	EM RELAÇÃO A FLUIDODINÂMICA DAS MISTURAS .....	85
5.3	EM RELAÇÃO A COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.....	86
5.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
6	REFERÊNCIAS .....	87
	APÊNDICE A .....	93
	PERDA AO FOGO .....	93
	PODER CALORÍFICO .....	94

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade cada vez maior da utilização de recursos renováveis para geração de energia vem impulsionando pesquisas que utilizam biomassas disponíveis em substituição a combustíveis fósseis, que por sua vez são finitos e poluentes. A biomassa no Brasil é altamente relevante no setor elétrico e de transporte e, portanto, estudos neste sentido são de suma importância. Estima-se que, no Brasil, o potencial de cogeração utilizando biomassa seria suficiente para atender metade do aumento da demanda de energia nos próximos dez anos (WORLD ENERGY COUNCIL, 2013).

Uma das formas mais eficientes de conversão de biomassa em energia elétrica é através de sua combustão em leito fluidizado. Os leitos fluidizados são amplamente utilizados na indústria, pois o estado fluidizado proporciona uma mistura entre o particulado e o fluido com altas taxas de transferência de calor e de massa, além de uma boa homogeneidade de temperatura da mistura (CREMASCO, 2012), (TANNOUS e LOURENÇO, 2015).

Devido às características de algumas biomassas, que geralmente possuem formatos completamente aleatórios e irregulares, torna-se bastante difícil a sua completa fluidização sem a utilização de um meio inerte. São utilizados normalmente como inerte areia, alumina ou calcita (RAO e BHEEMARASETTI, 2001).

As características da biomassa, bem como do material inerte, tais como massa específica, tamanho e esfericidade, influenciam diretamente a fluidização, além de serem dados essenciais para o projeto de leitos fluidizados. Além das propriedades específicas dos particulados, as proporções das misturas entre particulados e inertes impactam nas características da fluidização.

Desta forma, este trabalho visa a caracterização física de biomassas e de um material inerte e o comportamento fluidodinâmico de suas misturas. A biomassa proveniente das cascas de eucalipto e de pinus são resíduos comuns gerados na indústria madeireira e que apresentam potencial energético, observados nas análises de perda ao fogo e poder calorífico apresentados no Apêndice A deste trabalho. Sendo assim, no presente trabalho, foram utilizadas estas biomassas, fornecidas por uma empresa de produção de painéis de MDP (partículas de média densidade), localizada na cidade de Montenegro-RS.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral do presente trabalho é caracterizar a fluidodinâmica de leitos fluidizados compostos por misturas de biomassas de madeira e areia.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

Determinar as características físicas das cascas de pinus e de eucalipto.

Determinar as curvas de fluidização, velocidade de mínima fluidização, expansão do leito versus a velocidade superficial do gás e porosidade de leito no estado de mínima fluidização.

Avaliar o comportamento do escoamento multifásico com diferentes proporções de biomassa e areia.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho é composto pela fundamentação teórica, descrição da tecnologia de fluidização e metodologia experimental utilizada no desenvolvimento e resultados esperados.

O capítulo 2 apresenta uma breve descrição sobre o processo de fluidização em leitos formados por particulados homogêneos e heterogêneos e sobre a caracterização destes particulados, além de uma revisão bibliográfica sobre o assunto, abordando estudos e experimentos realizados utilizando misturas binárias de biomassa e inerte.

O capítulo 3 aborda a metodologia empregada para realizar os experimentos e uma descrição sobre o projeto de uma bancada de fluidização desenvolvida durante a realização deste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados os resultados encontrados e o comparativo com a literatura.

O capítulo 5 apresenta as conclusões.



## 2 FLUIDIZAÇÃO

Fluidização é a operação na qual partículas sólidas se comportam como um fluido ao serem suspensas pelo escoamento de um gás ou líquido (BASU, 2006).

Quando o fluido escoar a baixa velocidade, através dos espaços vazios entre as partículas em um leito, sem, entretanto, causar a sua suspensão, chama-se o processo de escoamento em leito fixo. Aumentando a velocidade do fluido, as partículas sólidas se agitam causando a expansão do leito e, ao aumentar ainda mais a velocidade do fluido, a ponto de suspender as partículas sólidas, ocorre a formação do leito fluidizado. A suspensão das partículas ocorre a partir do momento em que a força de arrasto associada à interação entre o fluido e as partículas expandidas devido ao escoamento ascendente do fluido se iguala ao peso aparente das partículas. (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Um bom entendimento da fluidodinâmica é de suma importância para o funcionamento e dimensionamento de leitos fluidizados (BASU, 2006).

### 2.1 Fluidização de partículas homogêneas

Neste item, são apresentados alguns conceitos sobre regimes de fluidização, velocidade de mínima fluidização e classificação de sólidos particulados.

#### 2.1.1 Regimes de fluidização

Os regimes de fluidização podem ser dos tipos homogêneo, borbulhante, slug, turbulento e fluidização rápida, conforme mostra a Figura 1. Estes regimes de fluidização variam em função das características do fluido (massa específica e viscosidade), do sólido (tamanho das partículas, granulometria, forma e massa específica) e ainda do equipamento de fluidização (temperatura e vazão de fluido, compactação do leito sólido, altura do leito e diâmetro) (CREMASCO, 2012). Na Figura 1, a velocidade superficial do gás refere-se à velocidade do gás através do leito vazio, ou seja, sua vazão volumétrica dividida pela área transversal do leito.



#### 2.1.1.1 Leito fixo

Inicialmente o fluido escoar por entre os sólidos sem deslocar as partículas. Este regime de escoamento é chamado de leito fixo (BASU, 2006) (CREMASCO, 2012) (OKA, 2004).

#### 2.1.1.2 Leito borbulhante

Com o aumento da vazão do fluido atinge-se a velocidade de mínima fluidização. Neste instante ocorre a expansão do leito, onde as partículas da fase sólida se afastam umas das outras, facilitando, assim, o escoamento do fluido. Com o afastamento das partículas, a perda de pressão é reduzida, e geralmente inicia-se o regime de leito borbulhante. Neste regime, a queda de pressão é igual ao peso aparente do material do leito por unidade de área de seção do leito.

Em um caso ideal, com partículas homogêneas, a queda de pressão se mantém constante com o aumento da velocidade do fluido no estado borbulhante. Este regime caracteriza-se pela formação de bolhas, responsáveis pela expansão do leito, pois ocupam o espaço antes ocupado pelo sólido particulado. O surgimento e o deslocamento destas bolhas causam uma grande agitação entre as partículas sólidas, intensificando a mistura entre as fases (BASU, 2006) (CREMASCO, 2012) (OKA, 2004).

#### 2.1.1.3 Leito turbulento

Aumentando ainda mais a velocidade do fluido, as bolhas começam a se dividir em bolhas menores, aumentando então a fase de emulsão do leito. Nesta fase, o leito apresenta uma superfície irregular, diferente da fase borbulhante. Na superfície do leito são formados aglomerados de particulado que tendem a retornar para a parte mais inferior enquanto o particulado mais leve é arrastado pelas bolhas. Esta movimentação faz com que a interação entre as fases sólidas e gasosa seja mais intensa que na fase borbulhante (BASU, 2006) (CREMASCO, 2012) (OKA, 2004).

#### 2.1.1.4 Fluidização rápida

Quando a velocidade do fluido é muito maior que a velocidade de mínima fluidização, atinge-se a velocidade de transporte das partículas e as mesmas são arrastadas para fora do leito, no que consiste no processo de elutriação. Este regime é chamado de fluidização rápida.

No caso da recirculação destas partículas de volta para o leito tem-se o chamado leito fluidizante circulante (LFC). Neste regime a queda de pressão é reduzida em relação aos regimes borbulhante e turbulento e varia de acordo com a taxa de material particulado recirculante. Quanto maior a quantidade de particulado recirculante, maior a queda de pressão (BASU, 2006) (CREMASCO, 2012) (OKA, 2004).

#### 2.1.1.5 Transporte pneumático

No momento que a velocidade do fluido se torna maior que a velocidade terminal de todas as partículas, então ocorre o transporte pneumático diluído (BASU, 2006) (CREMASCO, 2012) (OKA, 2004).

#### 2.1.2 Classificação de Geldart para sólidos particulados

Geldart (1973) estabeleceu um critério de classificação de sólidos particulados baseado em seu comportamento na fluidização, em função da diferença entre as massas específicas do sólido e do fluido, e do diâmetro médio das partículas. A Figura 3 pode ser utilizada para identificar o grupo de Geldart e o tipo de fluidização esperado. No eixo das abscissas é identificado o tamanho médio do particulado e no eixo das ordenadas apresenta-se a diferença da massa específica do particulado ( $\rho_s$ ) e a massa específica do gás de fluidização ( $\rho_g$ ).

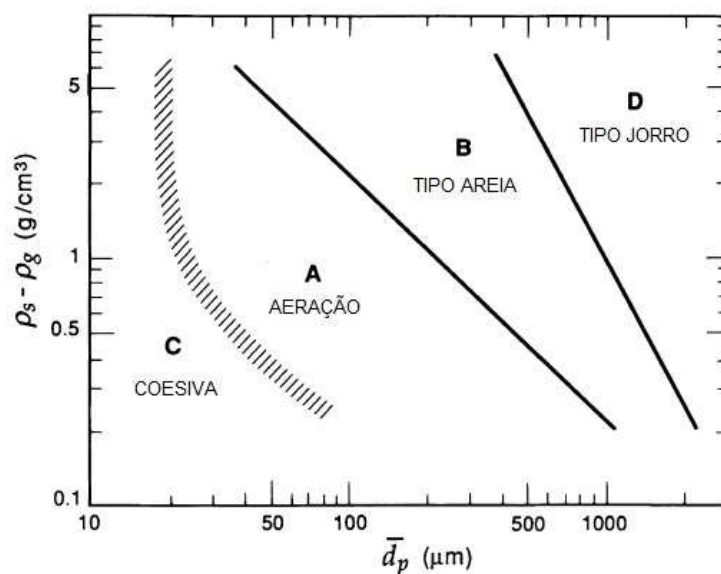


Figura 3 – Classificação de Geldart

Fonte: Adaptado de (KUNII e LEVENSPIEL, 1991)

Abaixo descrevem-se os tipos de fluidização que ocorrem para cada grupo de partículas.

**Grupo A** – fluidização com aeração: a fluidização destes particulados gera a expansão do leito de forma homogênea sem a presença de bolhas.

**Grupo B** – fluidização tipo areia: a fluidização ocorre no regime borbulhante. A areia é um exemplo típico deste grupo.

**Grupo C** – fluidização coesiva: particulado muito fino e aderente, como farinhas. Difícil de fluidizar, gerando normalmente caminhos preferenciais no leito.

**Grupo D** – fluidização tipo jorro: grupo formado por particulados grandes como grão de feijão, milho e outros. Necessitam de uma vazão alta de gás, porém com velocidades pouco acima da mínima velocidade de fluidização.

### 2.1.3 Velocidade teórica de mínima fluidização

Segundo Oka (2004), a velocidade de mínima fluidização de um sólido particulado é a velocidade na qual as partículas iniciam a flutuação. No momento em que a fluidização inicia, se a velocidade do fluido continuar aumentando, a queda de pressão ao longo do leito se mantém constante, portanto a velocidade de mínima fluidização pode ser determinada através do diagrama de queda de pressão versus a velocidade de fluidização, conforme Figura 4.

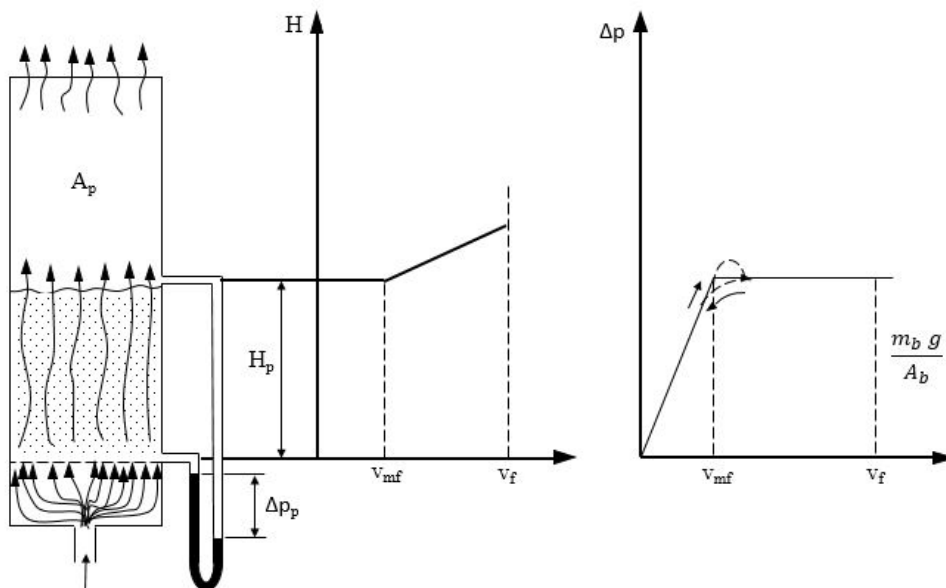


Figura 4 – Queda de pressão versus velocidade de fluidização.

Fonte: Adaptado de (OKA, 2004)

A velocidade de mínima fluidização é dada através do balanço de forças, onde a queda de pressão devido ao arrasto se iguala ao peso aparente do sólido particulado por unidade de área (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

$$\left( \begin{array}{c} \text{força de arrasto} \\ \text{devido ao escoamento} \\ \text{do fluido} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{peso do} \\ \text{sólido} \\ \text{particulado} \end{array} \right) \quad (1)$$

A equação (1) relaciona então a força de arrasto e as forças gravitacionais sobre o sólido, para estabelecer as condições de mínima fluidização.

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (2)$$

onde  $\Delta p_b$  é a queda de pressão através do leito,  $L_{mf}$  e  $\varepsilon_{mf}$  são a altura e a porosidade do leito nas condições de mínima fluidização, respectivamente,  $\rho_p$  é a massa específica real do sólido,  $\rho_g$  é a massa específica do fluido e  $g$  a aceleração da gravidade.

A porosidade do leito é definida pela relação entre a massa específica aparente e real do sólido, conforme equação (3).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_p} \quad (3)$$

onde  $\rho_{ap}$  e  $\rho_p$  são as massas específicas aparente e real do sólido, respectivamente.

Ainda, segundo Ergun (1952), a queda de pressão em um leito fluidizado de partículas homogêneas de diâmetro igual a  $d_p$  pode ser relacionada com a altura do leito de:

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu u_{mf}}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g u_{mf}^2}{\phi_s d_p} \quad (4)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $u_{mf}$  a velocidade mínima de fluidização e  $\phi_s$  a esfericidade das partículas.

A esfericidade é um parâmetro que indica o quão esférica uma partícula é. A definição clássica de esfericidade foi proposta por Wadell (1932) que a estabelece como a razão entre a

área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula e a área superficial da partícula, conforme a equação (5).

$$\phi_s = \frac{\text{área superficial da esfera equivalente}}{\text{área superficial da partícula}} \quad (5)$$

Portanto, quanto mais próximo de 1 o valor de  $\phi_s$ , mais esférica é a partícula.

A combinação das equações (2) e (4) resulta em:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (6)$$

A equação (6) pode ser reescrita em termos do número de Reynolds (nas condições de mínima fluidização),

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (7)$$

e número de Arquimedes:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (8)$$

Assim, tem-se:

$$Ar = 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} Re_{mf}^2 + 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} Re_{mf} \quad (9)$$

É comum que se escreva a equação (9) na forma:

$$K_1 Re_{mf}^2 + K_2 Re_{mf} = Ar \quad (10)$$

onde:

$$K_1 = 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \quad (11)$$

e

$$K_2 = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \quad (12)$$

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), os autores Wen e Yu (1966) identificaram que  $K_1$  e  $K_2$  permanecem constantes para diferentes tipos de partículas em diversas condições de escoamento ( $0,001 < Re < 4000$ ). Diversos outros autores realizaram experimentos para determinação das constantes  $K_1$  e  $K_2$ , sem porém entrar no mérito dos valores de  $\varepsilon_{mf}$  e  $\phi_s$ . Seus resultados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores das constantes  $K_1$  e  $K_2$  por diversos autores.

<b>Autores</b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>
Wen e Yu (1966)	33,7	0,0408
Richardson (1971)	25,7	0,0365
Saxena e Vogel (1977)	25,3	0,0571
Babu et al. (1978)	25,25	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408
Chitester et al. (1984)	28,7	0,0494

Fonte: Adaptado de (YANG, 2003)

## 2.2 Fluidização de misturas heterogêneas

Algumas biomassas não podem ser fluidizadas facilmente, devido a seu formato, tamanho e massa específica. Para viabilizar a fluidização, é utilizado normalmente um material inerte como areia e alumina, formando então um sistema polidisperso. Nestes casos, cada fase da mistura ou cada componente particulado possui uma velocidade de mínima fluidização



diferente e normalmente um valor aparente é definido para caracterizar o leito como um todo (RAO e BHEEMARASETTI, 2001) e (REINA, VELO e PUIGJANER, 2000).

Segundo Rowe e Nienow (1976), quando, em um sistema binário, os componentes possuem diferenças em tamanho e densidade, ocorre o fenômeno de segregação da mistura. Eles estudaram estes sistemas e denominaram os componentes da mistura como:

- Componentes emergentes: cujas partículas tendem a flutuar no leito;
- Componentes imergentes: cujas partículas tendem a ficar no fundo do leito.

Os mesmos autores concluíram que, em uma mistura binária, os componentes podem ser identificados em função de sua densidade - pesados e leves - em função de seu tamanho - grandes e pequenos - e ainda em função da velocidade de fluidização - alta e baixa. Assim, os componentes pesados são os imergentes e os leves são os emergentes. Se os componentes possuírem a mesma densidade média, então o de maior tamanho se torna o imergente e o de menor tamanho, o emergente.

A partir destas definições, Chiba, Chiba, *et al.* (1979) observaram que, durante o processo de fluidização, a mistura pode formar os estados de segregação completamente misturado, completamente segregado ou parcialmente misturado, conforme a Figura 5.

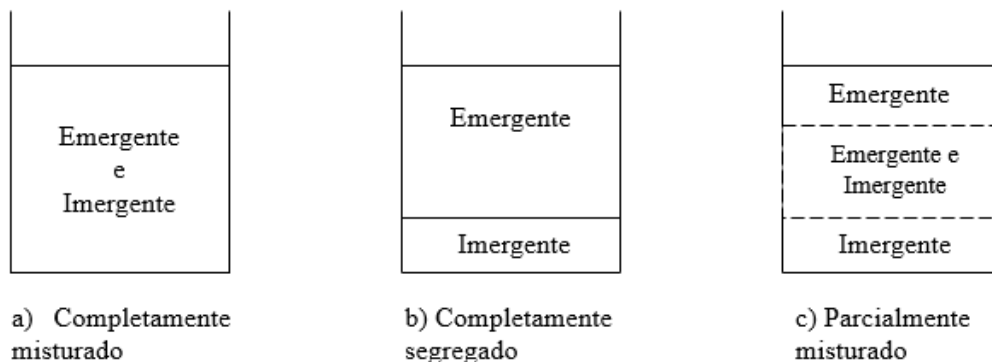


Figura 5 – Estados de segregação de uma mistura binária.

Fonte: Adaptado de (CHIBA, CHIBA, *et al.*, 1979)

Estes estados são então definidos como:

Figura 5a) Estado completamente misturado: Sistema com pequena diferença de tamanho entre as partículas. Neste caso, uma única velocidade de mínima fluidização é definida para a mistura ( $u_{mf}$ ). Também é possível determinar a velocidade de mínima fluidização para os componentes imergente ( $u_i$ ) e emergente ( $u_e$ ) individualmente.

Figura 5b) Estado completamente segregado: Neste sistema, um componente é ao mesmo tempo maior e mais denso. A curva de fluidização será a resultante das curvas dos componentes independentes.

Figura 5c) Estado parcialmente misturado: Uma camada do componente imersível é formada no fundo, outra camada do componente emergível formada no topo e no meio uma mistura dos dois componentes. A velocidade de mínima fluidização é definida como  $u_{ms}$ .

As curvas de fluidização destes sistemas podem ser identificadas na Figura 6, onde  $u_{mf,I}$  e  $u_{mf,E}$  são as velocidades de mínima fluidização dos componentes imergente e emergente,  $u_{mf,M}$  e  $u_{mf,S}$  são a velocidades de mínima fluidização da mistura completamente misturada e completamente segregada e  $u_{mf,MS}$  é a velocidade de mínima fluidização da mistura parcialmente misturada.

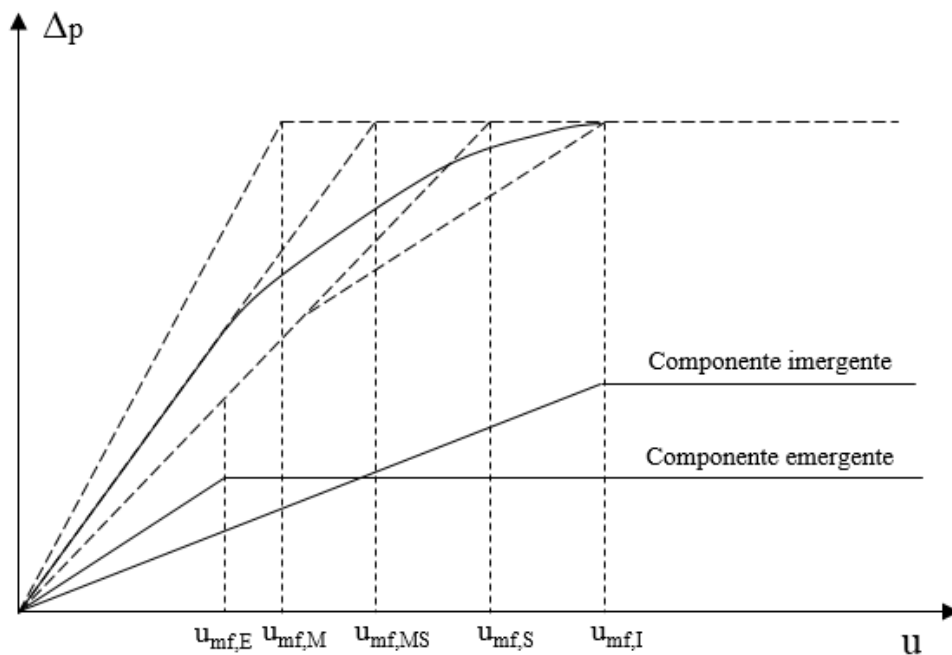


Figura 6 – Curvas de fluidização

Fonte: Adaptado de (CHIBA, CHIBA, *et al.*, 1979)

Assim, os autores concluíram que a velocidade de mínima fluidização de um sistema binário poderia ser definida a partir da combinação das velocidades de mínima fluidização de cada um dos componentes da mistura.

Como pode-se inferir pela primeira linha da Tabela 1, os autores Wen e Yu (1966) sugerem que a velocidade de mínima fluidização para sistemas de um único componente pode ser determinada pela equação:

$$\frac{du_{mf}\rho_g}{\mu} = \left[ 33,7^2 + 0,0408 \frac{d^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{2}} - 33,7 \quad (13)$$

A partir daí, Goossens, Dumont e Spaepen (1971) modificaram a equação (13) substituindo a massa específica da partícula ( $\rho_p$ ) pela massa específica média da mistura ( $\overline{\rho_m}$ ), conforme equação (14) e o tamanho de partícula pelo tamanho médio das partículas da mistura ( $\overline{d_m}$ ), conforme equação (15).

$$\frac{1}{\overline{\rho_m}} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} \quad (14)$$

onde  $x_1$  e  $x_2$  são as frações mássicas, na mistura, dos componentes 1 e 2, respectivamente, e  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são as massas específicas dos componentes 1 e 2, respectivamente,

$$\overline{d_m} = d_1 d_2 \left[ \frac{x_1 \rho_2 + x_2 \rho_1}{x_1 \rho_2 d_2 + x_2 \rho_1 d_2} \right] \quad (15)$$

onde  $d_1$  e  $d_2$  são os diâmetros dos componentes 1 e 2, respectivamente.

A equação modificada por Goossens, Dumont e Spaepen (1971) fica então:

$$\frac{\overline{d_m} u_{mf} \rho_g}{\mu} = \left[ 33,7^2 + 0,0408 \frac{d^3 \rho_g (\overline{\rho_m} - \rho_g)}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{2}} - 33,7 \quad (16)$$

Os autores Rowe e Nienow (1976) propuseram equações para misturas binárias onde os componentes diferem somente em densidade e também uma extensão desta equação considerando a mistura de componentes diferentes em tamanho e massa específica. Ambas

equações não são satisfatórias para prever o valor da ( $u_{mf}$ ), pois dependem da porosidade das partículas que normalmente não é conhecida.

Cheung, Nienow e Rowe (1974) propuseram uma equação mais simplificada para a mistura de componentes de mesmo tamanho:

$$u_{mf} = u_e \left( \frac{u_i}{u_e} \right) \overline{x_{im}^2} \quad (17)$$

onde  $u_e$  e  $u_i$  são as velocidades de mínima fluidização dos componentes emergível e imersível, respectivamente, e  $x_{im}$  a fração mássica do componente imersível na mistura.

Eles identificaram que a equação é precisa em relação aos resultados experimentais para relações de tamanhos menores que 3.

Chiba, Chiba, *et al.*, (1979) realizaram experimentos utilizando misturas de particulados de cobre, esferas de vidro, partículas de carvão geradas no craqueamento de óleo combustível e ainda sílica oriunda de cinzas vulcânicas, com tamanhos variando de 115  $\mu\text{m}$  a 775  $\mu\text{m}$  e massas específicas variando de  $0,19 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  até  $8,9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Os experimentos foram realizados em leitos de diâmetro interno de 50 mm e de 100 mm e ar como meio de fluidização. Foram medidas a queda de pressão e a velocidade aparente do fluido a partir da defluidização da mistura. Os autores identificaram que a defluidização lenta (30 min) e a defluidização rápida (5 min) apresentaram os mesmos resultados. Os pesquisadores utilizaram a equação de Ergun (1952) para prever a ( $u_{mf}$ ). Na equação eles consideraram uma massa específica média para a mistura conforme definido por Goossens, Dumont e Spaepen (1971), e definiram um diâmetro médio para a mistura e assumiram uma porosidade constante. A partir destas considerações, não encontraram resultados satisfatórios entre a teoria e o experimento.

Formisani (1991) realizou experimentos com esferas de vidro de mesma massa específica, porém de diferentes diâmetros. As razões de diâmetros ( $d_p/d_f$ ) variaram entre 1,40 e 2,79 e as frações volumétricas do componente emergível entre 0,20 e 0,80. Os experimentos foram realizados em um leito com diâmetro interno de 0,101 m, utilizando ar comprimido, e as misturas sempre respeitando a razão de  $H/D = 1$ . Eles identificaram que, para misturas binárias de mesma densidade, a relação de Ergun pode ser utilizada, porém é necessária a determinação adequada da porosidade do leito e a utilização do diâmetro médio da mistura.

Para sistemas binários, Otero e Corella (1971) já haviam proposto que a velocidade aparente de mínima fluidização é uma ponderação das velocidades de mínima fluidização de cada componente pela sua massa, conforme a equação:

$$u_{mf} = u_{mf1}x_1 + u_{mf2}x_2 \quad (18)$$

A acurácia desta equação depende fortemente da forma como são obtidas as velocidades de mínima fluidização dos componentes da mistura individualmente. Uma das formas para determinar as velocidades é através da equação (10), mas muitos autores evitam sua utilização em função da dificuldade em calcular  $K_1$  e  $K_2$ , porém ela é a melhor forma para determinar a velocidade de mínima fluidização, pois leva em consideração as características do componente.

A partir da combinação da equação de Otero e Corella (1971) e a equação (10) de Ergun, Reina, Velo e Puigjaner (2000) propuseram novos valores para  $K_1$  e  $K_2$ . Os autores utilizaram 5 tipos de restos de madeira, sem misturar com algum inerte, em seus experimentos, sendo restos florestais, restos de demolição, sucata de mobílias, sucata de caixas de madeira e restos de estrados.

As amostras das biomassas foram trituradas e peneiradas para analisar a distribuição granulométrica de cada uma, conforme Tabela 2. Cada amostra caracteriza um sistema heterogêneo devido a variação granulométrica.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica das amostras (% em massa)

	$X_1$ (2-1,20 mm)	$X_2$ (1,20-0,71 mm)	$X_3$ (0,71-0,315 mm)	$X_4$ (0,315-0,177 mm)
Floresta	0,16	0,34	0,29	0,2
Demolição	0,24	0,59	0,14	0,03
Caixas de madeira	0,26	0,55	0,19	-
Mobília	0,24	0,56	0,18	0,02
Estrados	0,25	0,64	0,11	-

FONTE: Adaptado de (REINA, VELO e PUIGJANER, 2000).

Os ensaios foram realizados em um tubo de vidro com diâmetro interno de 51 mm e 1 m de altura e ar comprimido para fluidização com vazão entre 0,4 m<sup>3</sup>/h até 6 m<sup>3</sup>/h.

Os autores determinaram as velocidades de mínima fluidização experimental das biomassas através das curvas de fluidização ( $\Delta p$  vs.  $u_{ap}$ ) e ponderaram a partir da equação (18). Observaram mais de uma velocidade de mínima fluidização para cada amostra devido a heterogeneidade de tamanhos de partículas, conforme Figura 7.

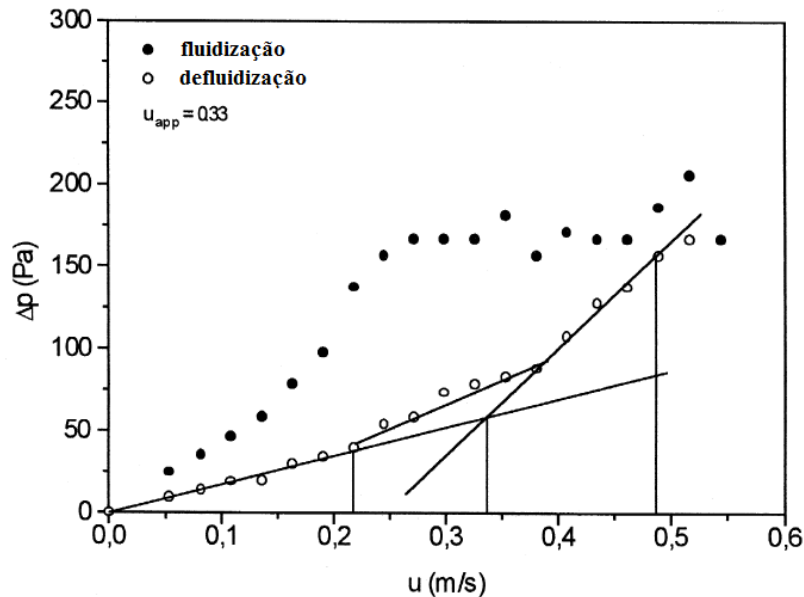


Figura 7 – Velocidade de mínima fluidização da madeira de móveis.

Fonte: Adaptado de (REINA, VELO e PUIGJANER, 2000)

Também mediram a massa específica aparente do leito e calcularam a porosidade através da massa específica de leito e massa específica aparente dos componentes. A partir destes dados, foram calculados novos valores para  $K_1 = 12,58$  e  $K_2 = 14,03$  utilizando um valor médio de  $\phi_s = 0,35$  e  $\epsilon_{mf} = 0,61$ , conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo entre as constantes  $K_1$  e  $K_2$

<b>Autores</b>	<b>Características das partículas</b>	<b><math>K_1</math></b>	<b><math>K_2</math></b>
Wen e Yu, 1966	$d_p > 0,508$ mm	14	11
Lucas et al., 1986	$0,1 < \phi < 0,5$	8,5	5
Reina et al., 2000	$1 \text{ mm} < d_p < 2 \text{ mm}$	12,58	14,03

Fonte: Adaptado de (REINA, VELO e PUIGJANER, 2000)

Reina, Velo e Puigjaner (2000) compararam seus valores experimentais com os previstos pelas correlações e perceberam que a sua correlação demonstrou uma precisão maior do que utilizando coeficientes determinados por outros autores.

Eles também observaram diversas irregularidades ao fluidizar as biomassas, conforme mostra a Figura 8.

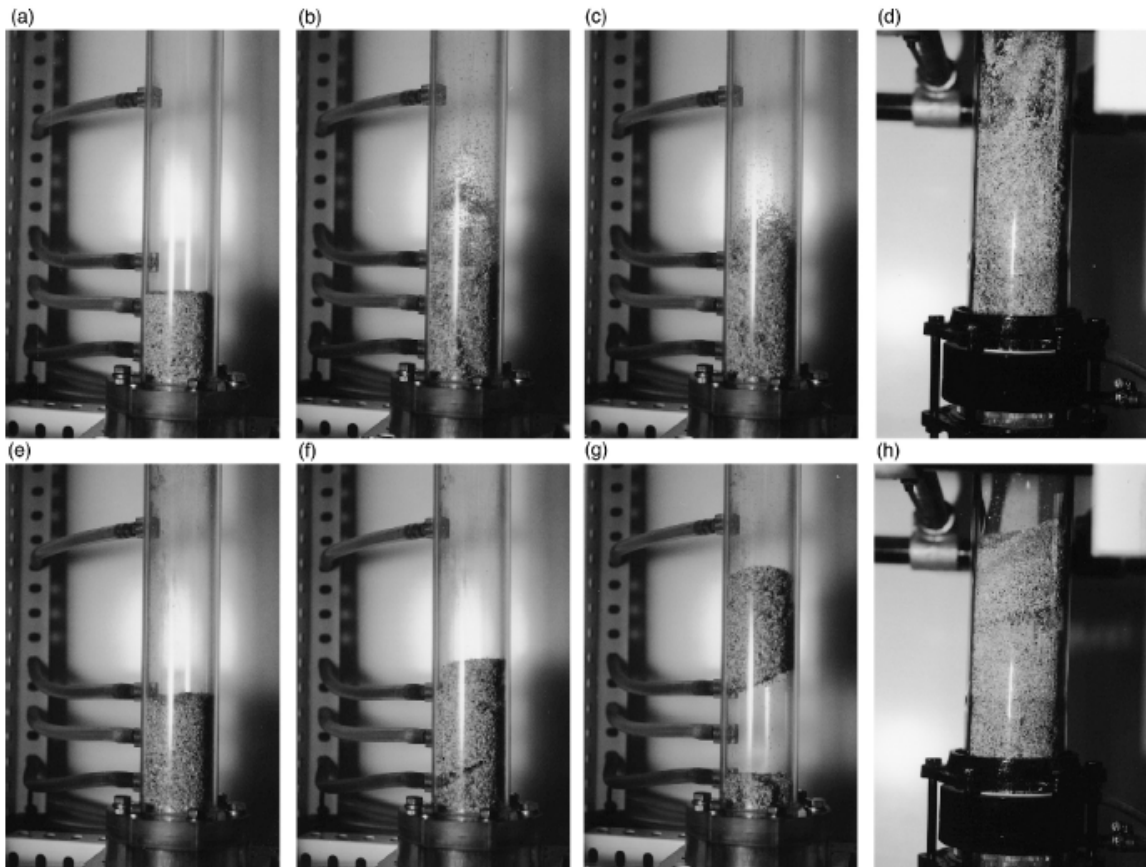


Figura 8 – Comportamento da fluidização das amostras de biomassa.

Fonte: Adaptado de (REINA, VELO e PUIGJANER, 2000).

Nas Figuras 8(a)-8(d) é observado o comportamento da fluidização dos restos de madeira de demolição, classificado pelos autores como madeira dura. Nas Figuras 8(e)-8(h) é observado o comportamento de fluidização da madeira de restos de estrados, classificado pelos autores como madeira macia. As classificações de madeira dura ou macia foi feita em função da massa específica de cada uma.

Nas Figuras 8(a) e (e) a vazão de gás é zero. Ao ponto que ao aumentar a vazão de gás eles observaram em algumas vezes a formação de canais preferenciais do gás, Figura 8(b). Já

na figura 8(f) e 8(g) ao invés de canais preferenciais de gás, os autores observaram que a amostra é levantada completamente.

Os autores concluíram que estes fenômenos ocorrem devido as características das madeiras utilizadas. As madeiras macias utilizadas no experimento possuem baixa densidade e são bastante fibrosas, dificultando, assim, a fluidização. Além disso, o atrito do gás com as partículas de madeira gera cargas eletrostáticas contribuindo para a aglomeração das partículas e possibilitando a elevação de todo o material.

Paudel e Feng (2013) conduziram experimentos com misturas binárias de inertes e biomassa. Utilizaram areia, esferas de vidro e alumina como componentes inertes e cascas de nozes e espigas de milho como biomassas, conforme Tabela 4. Nos experimentos, utilizaram um leito a frio feito de um tubo de acrílico com diâmetro interno de 14,5 cm e 1 m de altura, e ar como fluidizante. As misturas binárias variaram de 10% a 90% em massa de biomassa na mistura com incremento constante de 10%.

Tabela 4 – Propriedades dos particulados

Propriedade	Areia	Vidro particulado	Alumina	Casca de noz (fina)	Casca de noz	Espiga de milho
Formato	Esférico	Esférico	Angular	Esférico	Angular	Angular
Tamanho médio, $d_p$ [ $\mu m$ ]	240,8	383	490	100	856	1040
Massa específica das partículas, $\rho_p$ [ $g/cm^3$ ]	2,63	2,5	3,94	1,2	1,2	1,08
Massa específica aparente, $\rho_{ap}$ [ $g/cm^3$ ]	1,56	1,4	1,87	0,72	0,63	0,52
Porosidade de leito, $\varepsilon_m$	0,406	0,44	0,52	0,4	0,475	0,518

FONTE: Adaptado de (PAUDEL e FENG, 2013).

A partir da equação (10) e baseados em dados gerados por outros autores e em seus experimentos, Paudel e Feng (2013) propuseram novas correlações para determinar a velocidade de mínima fluidização de particulados homogêneos e misturas de biomassas e inertes.

Para os materiais inertes, eles utilizaram dados experimentais de dez autores diferentes, mais os resultados de fluidização de seus experimentos e os correlacionaram em um gráfico, conforme a Figura 9. Os dados se referem ao ponto de mínima fluidização do inerte.



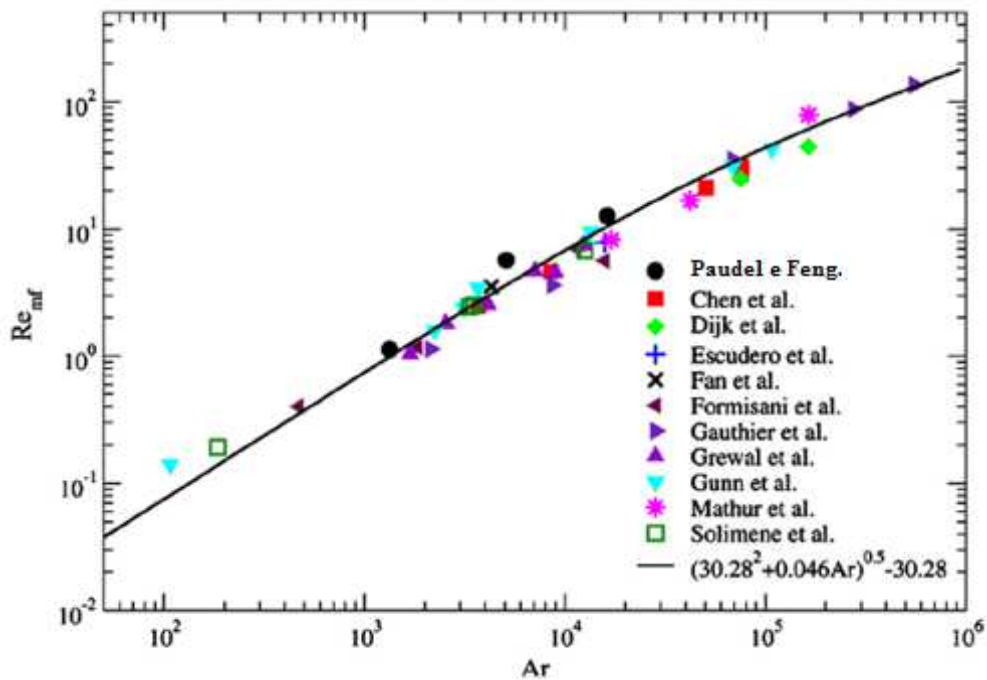


Figura 9 – Relação entre  $Re_{mf}$  e  $Ar$  para material inerte.

Fonte: Adaptado de (PAUDEL e FENG, 2013).

A partir do gráfico, da Figura 9, foram determinados os coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  na equação de Wen e Yu (1966), resultando na equação (19).

$$Re_{mf} = [K_1^2 + K_2 Ar]^{1/2} - K_1 \quad (19)$$

onde os coeficientes de  $K_1$  e  $K_2$  são 30,28 e 0,046 respectivamente.

Os autores concluíram que a correlação é possível, pois a fluidização do inerte é bem definida em função da homogeneidade do componente em relação ao tamanho e à massa específica. Além disso, as partículas individuais possuem formato bastante esférico, fazendo com que esta característica tenha pouca influência na fluidização.

Na análise das biomassas, os autores utilizaram os dados de quatro autores que podem ser visualizados na Tabela 5 e os dados gerados nos próprios experimentos e elaboraram o gráfico da Figura 10, que relaciona  $Re_{mf}$  e  $Ar$ .

Tabela 5 – Tipos de biomassa e diâmetro de leito

<b>Autores</b>	<b>Tipo de biomassa</b>	<b>Diâmetro do leito (D)</b>
Paudel e Feng (2013)	Casca de noz (fina), casca de noz e espiga de milho	14,5 cm
Abdullah et al. (2003)	Serragem, casca de arroz e casca de amendoim	6 cm
Escudero et al. (2010)	Casca de noz, espiga de milho	10,2 cm
Reina et al. (2000)	Restos de floresta, de demolição e de estrados	5,1 cm
Woh et al. (2007)	Cerne de palmeira	4,6 cm

FONTE: Adaptado de (PAUDEL e FENG, 2013).

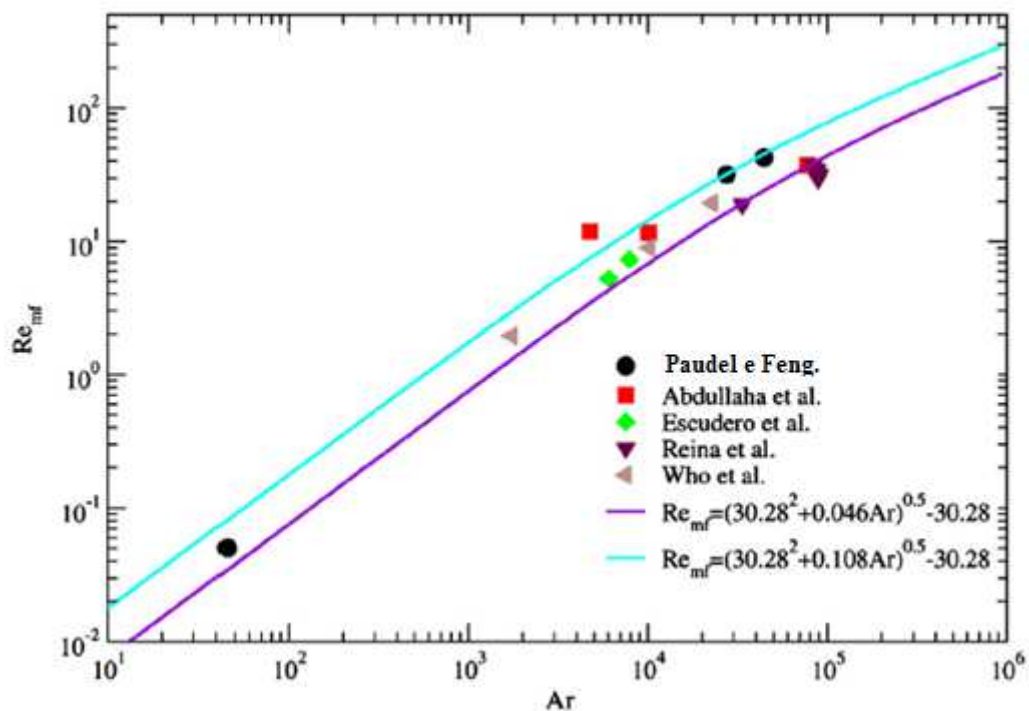


Figura 10 – Relação entre  $Re_{mf}$  e  $Ar$  para biomassas.

Fonte: Adaptado de (PAUDEL e FENG, 2013).

A equação (19) para inertes não corresponde aos dados de fluidização das biomassas, principalmente em função do formato irregular, tamanho grande e baixa massa específica e, portanto, os autores propuseram uma nova equação (20).

$$Re_{mf} = [K_1^2 + K_2 Ar]^{1/2} - K_1 \quad (20)$$

onde os coeficientes de  $K_1$  e  $K_2$  são 30,28 e 0,108 respectivamente.

Para analisar as misturas de inerte com biomassa, os autores utilizaram a massa específica e tamanho médio da mistura a partir das equações (14) e (15) de Goossens, Dumont e Spaepen (1971). Os valores foram substituídos nas equações (7) e (8) para determinar os números de  $Re_{mf}$  e  $Ar$ , respectivamente, formando as equações (21) e (22).

$$Re_{mf} = \frac{\overline{d_m} u_{mf} \rho_g}{\mu} \quad (21)$$

$$Ar = \frac{\overline{d_m}^3 \rho_g (\overline{\rho_m} - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (22)$$

onde  $\overline{d_m}$  e  $\overline{\rho_m}$  são o tamanho médio da mistura e massa específica média da mistura,  $\rho_g$  é a massa específica do gás,  $g$  a aceleração da gravidade e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do gás e  $u_{mf}$  é a velocidade de mínima fluidização da mistura.

Foram utilizados os dados de três autores diferentes, que também realizaram trabalhos com misturas binárias de inerte com biomassa, além dos dados dos experimentos dos próprios autores. Na Tabela 6, podem ser observados os dados dos experimentos envolvidos.

Tabela 6 – Dados dos experimentos com misturas de biomassa com inerte

<b>Autores</b>	<b>Tipo de biomassa</b>	<b>Diâmetro do leito (D)</b>	<b>Percentual em massa de biomassa</b>
Paudel e Feng (2013)	Casca de noz e espiga de milho	14,5 cm	10%-90% (com incrementos de 10%)
Chongdian e Guo (2008)	Talo de trigo e serragem	5,3 cm	20%, 30%, 40% e 50%
Rao e Bheemarasetti (2001)	Casca de arroz, serragem e casca de amendoim	10,2 cm	2%, 5%, 10% e 15%
Rao e Reddy (2010)	Casca de arroz, serragem e casca de amendoim	9 cm	5%, 12% e 13%

FONTE: Adaptado de (PAUDEL e FENG, 2013).

A partir destes dados, Paudel e Feng (2013) elaboraram o gráfico da Figura 11 que relaciona  $Re_{mf}$  e  $Ar$  para as misturas de inerte com biomassa.

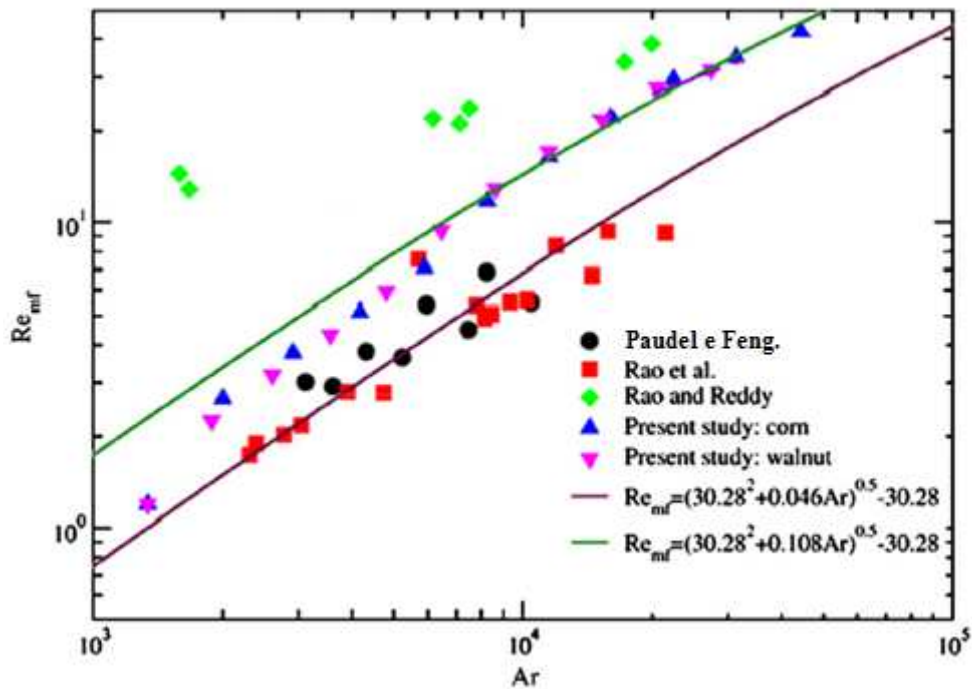


Figura 11 – Relação entre  $Re_{mf}$  e  $Ar$  para misturas de inerte com biomassa de diversas proporções.

Fonte: Adaptado de (PAUDEL e FENG, 2013).

Os autores concluíram que o percentual de biomassa na mistura afeta a velocidade de mínima fluidização e, baseados em seus resultados, propuseram a equação (23), que leva em consideração o percentual de biomassa em massa na mistura.

$$Re_{mf} = \{30,28^2 + [0,046(1 - \chi_b) + 0,108\chi_b^{1/2}]Ar\}^{1/2} - 30,28 \quad (23)$$

onde  $X_b$  é a concentração em percentual de biomassa em massa.

Paudel e Feng (2013) determinaram as velocidades de mínima fluidização a partir da nova equação (23) e compararam com os resultados experimentais, plotando os resultados no gráfico da Figura 12, que relaciona as velocidades de mínima fluidização para cada concentração de biomassa  $\chi_b$ .

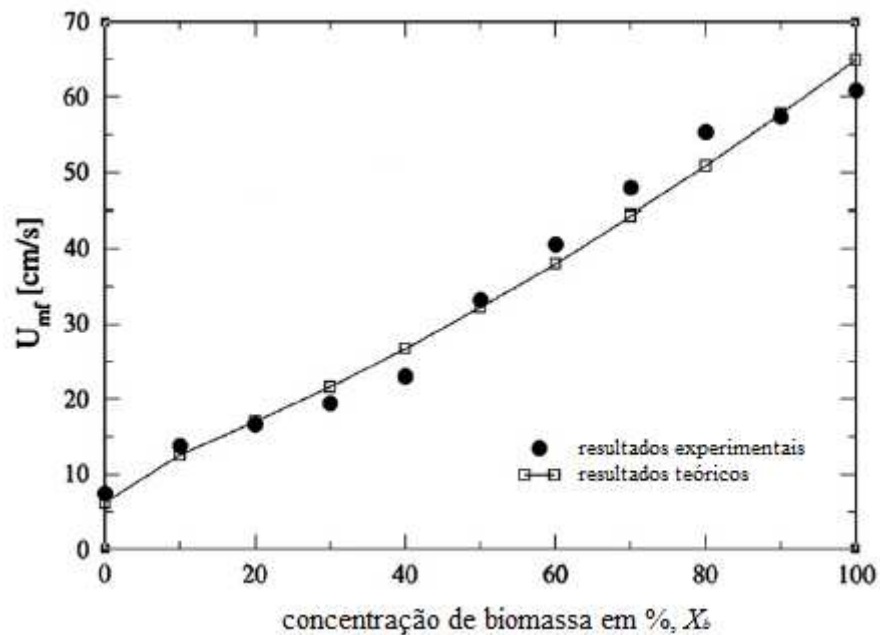


Figura 12 – Velocidades de mínima fluidização teórica e experimental para misturas de biomassa (espiga de milho) e areia.

Fonte: Adaptado de (PAUDEL e FENG, 2013).

Eles verificaram que a equação (23) é consistente e apresentou variações abaixo de 10% entre os valores teóricos e experimentais.

### 2.3 Caracterização das Fases Sólidas

A fluidodinâmica dos leitos fluidizados depende das propriedades físicas das partículas sólidas e sua caracterização inclui tamanho, massa específica, formato, além do comportamento dinâmico em relação ao fluido, como coeficiente de arrasto e velocidade terminal. No presente trabalho dá-se ênfase à caracterização física das partículas a qual inclui determinação da massa específica, granulometria e esfericidade.

A maioria das partículas utilizadas são irregulares no formato e morfologia da superfície e, portanto, existem diferentes métodos e técnicas para caracterizar as partículas (YANG, 2003).

### 2.3.1 Massa específica real

A massa específica de um material é definida pela razão entre a sua massa e o seu volume sem considerar os espaços vazios ou poros que as partículas possuem, conforme equação (24). Em uma mistura pode ser difícil determinar o volume de cada partícula e, portanto, se utiliza o método chamado picnometria para determinar a massa específica real (CREMASCO, 2012).

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (24)$$

onde  $m_p$  é a massa do particulado e  $V_p$  é o volume do particulado desconsiderando os espaços vazios e poros.

### 2.3.2 Massa específica aparente

A massa específica aparente é a razão entre a massa das partículas e o volume ocupado por estas em determinado volume conhecido. Esta é sempre menor que a massa específica real, uma vez que no volume ocupado pelo particulado existem espaços vazios. Ela depende de diversas características das partículas como tamanho, formato e fator de empacotamento, que é o quanto elas estão compactadas no leito (OKA, 2004).

A massa específica aparente é definida pela equação (25).

$$\rho_{ap} = \frac{m_a}{V_a} \quad (25)$$

onde  $m_a$  é a massa da amostra e  $V_a$  é o volume ocupado pela amostra.

### 2.3.3 Tamanho das partículas

As partículas individuais do material particulado podem ter diversas formas e seu tamanho é de difícil determinação. Materiais compostos de partículas esféricas uniformes são facilmente definidos pelo diâmetro da esfera. Partículas irregulares podem ter diversas dimensões características (OKA, 2004).

Partículas irregulares têm seu tamanho normalmente definido baseado em alguma propriedade de referência. A escolha de um diâmetro equivalente para caracterização de tais partículas depende na maioria das vezes da aplicação pretendida. Diversas definições de diâmetro equivalente têm sido utilizados para caracterizar o tamanho das partículas irregulares (YANG, 2003). As definições mais comuns estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Diferentes definições para diâmetro equivalente de partículas

Nº	Termo	Definição
1	Média aritmética	$d_p = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$ ou $d_p = \frac{(d_1 + d_2 + d_3)}{3}$
2	Média geométrica	$d_p = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$ ou $d_p = \sqrt{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}$
3	Média logarítmica	$d_p = \frac{d_1 + d_2}{\log(d_1/d_2)}$
4	Diâmetro médio de superfície	$d_p = \sqrt{\frac{A_p}{\pi}}$
5	Diâmetro médio volumétrico	$d_p = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{1/3}$
6	Diâmetro médio mássico	$d_p = \left(\frac{6m_p}{\pi\rho_p}\right)^{1/3}$

Fonte: (OKA, 2004)

### 2.3.4 Formato

O formato das partículas tem papel importante no comportamento da fluidização, influenciando no valor da velocidade terminal e superfície de contato das partículas. Existem diversas definições para descrever o formato de partículas irregulares baseadas nas dimensões, volume e área superficial, tais como arredondamento, alongamento e esfericidade (CREMASCO, 2012).

Massarani e Peçanha (1986) definiram a esfericidade como sendo a razão entre os diâmetros das esferas inscritas e circunscritas a uma partícula, conforme Figura 13.

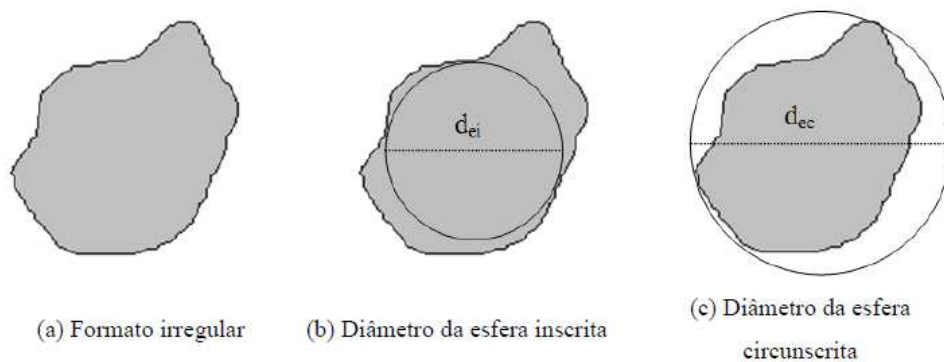


Figura 13 – Diâmetros inscrito e circunscrito em uma partícula irregular

Fonte: (LOURENÇO, 2012).

Por definição, a esfericidade é determinada pela equação:

$$\phi_s = \frac{d_{ei}}{d_{ec}} \quad (26)$$

onde  $d_{ei}$  e  $d_{ec}$  são os diâmetros inscrito e circunscrito em uma partícula de formato irregular.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é destinado à descrição dos materiais utilizados e das metodologias experimentais empregadas no desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1 Caracterização das amostras de biomassas e inertes

Foram utilizadas amostras de casca de pinus (*Pinus elliotti*) e eucalipto (*Eucalyptus*), cedidas por uma empresa produtora de painéis de MPD (partículas de média densidade em inglês) de Montenegro.

As toras de eucalipto, (Figura 14) e pinus, (Figura 15) são misturadas de acordo com a receita do processo e descascadas juntas. Para o experimento, foram coletadas amostras de ambas as espécies de casca separadamente e as mesmas foram caracterizadas individualmente.



Figura 14 – Estoque de toras de Eucalipto



Figura 15 – Estoque de toras de Pinus

Usualmente, a casca removida das toras é utilizada para realizar a combustão em uma fornalha para produção de energia para secagem e aquecimento de óleo térmico da planta. A biomassa é armazenada em um galpão após ser picada (Figura 16). As toras descascadas são utilizadas na produção dos painéis de MDP.



Figura 16 – Estoque de biomassa para combustão

Como material inerte foram utilizados dois tipos de areia, denominadas areia 01 e areia 02, Figura 17. A areia 01, de coloração mais escura passou por um processo de regeneração após ter sido utilizada em processos de fundição. A areia 02 é areia comum adquirida em lojas de materiais de construção.



(a) Areia 01



(b) Areia 02

Figura 17 – Amostras de areia

### 3.1.1 Preparação das amostras

As cascas coletadas foram picadas em amostras menores, como mostram a Figura 18 e Figura 19, para viabilizar o trabalho, utilizando-se de um moinho da marca SEIBT, modelo MGHS 270 A, no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMAT) da Unisinos, conforme Figura 20. O processo de picagem é feito após secagem das amostras em estufa para remoção da umidade. Este procedimento foi realizado com as cascas de eucalipto e de pinus.



Figura 18 – Casca de eucalipto moída



Figura 19 – Casca de pinus moída



Figura 20 – Moinho SEIBT MGHS 270 A

### 3.1.2 Tamanho médio das partículas

Para determinar o tamanho médio das amostras, foi realizada a análise granulométrica utilizando um conjunto de peneiras, do LCVMAT, com abertura padronizada seguindo a norma ISO 3310/1, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Padrão das peneiras utilizadas

Malha [mesh]	Abertura [ $\mu\text{m}$ ]
4	4750
6	3350
12	1700
20	850
30	600
40	425
50	300
70	212
100	150
140	106
200	75
270	53

Foram escolhidas amostras de 200 g para areia e 30 g para a casca de pinus. Estas amostras foram definidas para evitar a obstrução das peneiras. Após o peneiramento manual, foram pesadas as massas retidas em cada peneira e assim determinadas as frações mássicas ( $x_i$ )

para cada uma. Foram então calculados os diâmetros médios entre as peneiras ( $\bar{d}_{pi}$ ) e calculado o diâmetro médio de Sauter ( $\bar{d}_p$ ), definido pelas equações (27) e (28).

$$\bar{d}_{pi} = \frac{d_{pi} + d_{pi+1}}{2} \quad (27)$$

onde  $d_{pi}$  é o diâmetro da peneira e  $d_{pi+1}$  é o diâmetro da peneiro posterior.

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \left( \frac{x_i}{\bar{d}_{pi}} \right)} \quad (28)$$

onde  $x_i$  é a fração mássica de amostra retida na peneira e  $d_{pi}$  é o diâmetro médio entre as peneiras determinado pela equação (27). Este procedimento foi realizado em triplicata para cada um dos materiais.

As partículas de eucalipto possuem uma morfologia fibrosa, de formato alongado e fino, porém de diversos tamanhos. Devido a estas características as partículas formam aglomerados volumosos e leves, impossibilitando assim uma análise adequada de granulométrica.

A solução adotada foi realizar o peneiramento de uma amostra de eucalipto, de 60 g utilizando uma peneira única com abertura média de 537,50  $\mu\text{m}$ . A amostra de eucalipto foi colocada na peneira e então foi realizada a agitação manual da peneira. As partículas de eucalipto que passaram pela peneira foram pesadas com valor médio de 48 g, portanto 80% da amostra. As partículas menores não puderam ser peneiradas em função do seu formato.

Para medição da abertura da peneira, foi fotografada uma imagem ampliada da peneira com uma escala, conforme pode ser observado na Figura 21. A partir da escala, foram medidas algumas aberturas da tela utilizando o software Autocad e calculada a abertura média.

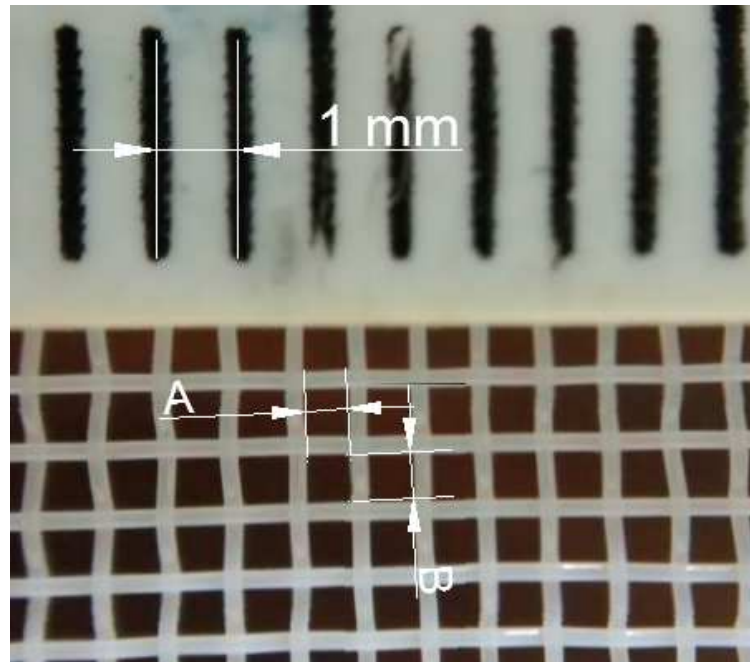


Figura 21 – Tela utilizada para análise do eucalipto

### 3.1.3 Massa específica real

Para determinação das massas específicas das amostras, foram realizados ensaios de picnometria com água, baseados na norma NP EN 1097-6. Foi possível determinar a massa específica da areia, porém não houve êxito com as biomassas, pois estas são muito leves. Foi então feita uma tentativa utilizando-se benzeno xilol, porém ainda assim não foi possível pois parte da biomassa não submergia.

Optou-se pela utilização de um picnômetro a gás hélio da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340 do LCVMAT, conforme Figura 22. O equipamento possui uma precisão de  $\pm 0,02\%$  e exatidão de  $0,03\%$  na leitura, além de  $0,03\%$  da capacidade da amostra.



Figura 22 – Picnômetro AccuPyc II 1340

A análise se baseia na variação de pressão e volume de gás hélio entre duas câmaras de volumes calibrados. Uma quantidade conhecida de massa da amostra é colocada no primeiro reservatório e este então é pressurizado com gás. Após a estabilização da pressão neste primeiro reservatório, o gás é liberado para outra câmara, de volume também conhecido. Após a estabilização da pressão, a pressão é novamente medida. A massa específica da amostra é então calculada pela variação da pressão do gás e da massa da amostra.

#### 3.1.4 Massa específica aparente

Para obtenção da massa específica aparente de cada material, foi pesada e colocada no leito uma quantidade suficiente para manter a proporção  $H/D \approx 1$ , conforme Figura 23.



Figura 23 – Medição da altura inicial do leito

Foi então medida a altura do material na coluna e calculado o volume aparente. Dividindo a massa total adicionada no leito, pelo volume ocupado, determinou-se a massa específica aparente. O procedimento foi realizado em triplicata para cada um dos materiais individualmente.

### 3.1.5 Esfericidade das partículas

Devido à irregularidade e dimensões das partículas de eucalipto e de pinus, não foi possível determinar sua esfericidade. Já para as partículas de areia, a esfericidade foi determinada a partir da equação (26) de Massarani e Peçanha (1986).

Com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (ITT FOSSIL), da Unisinos foi analisada a amostra de areia 01. Na Figura 24 está apresentada a imagem obtida no microscópio.

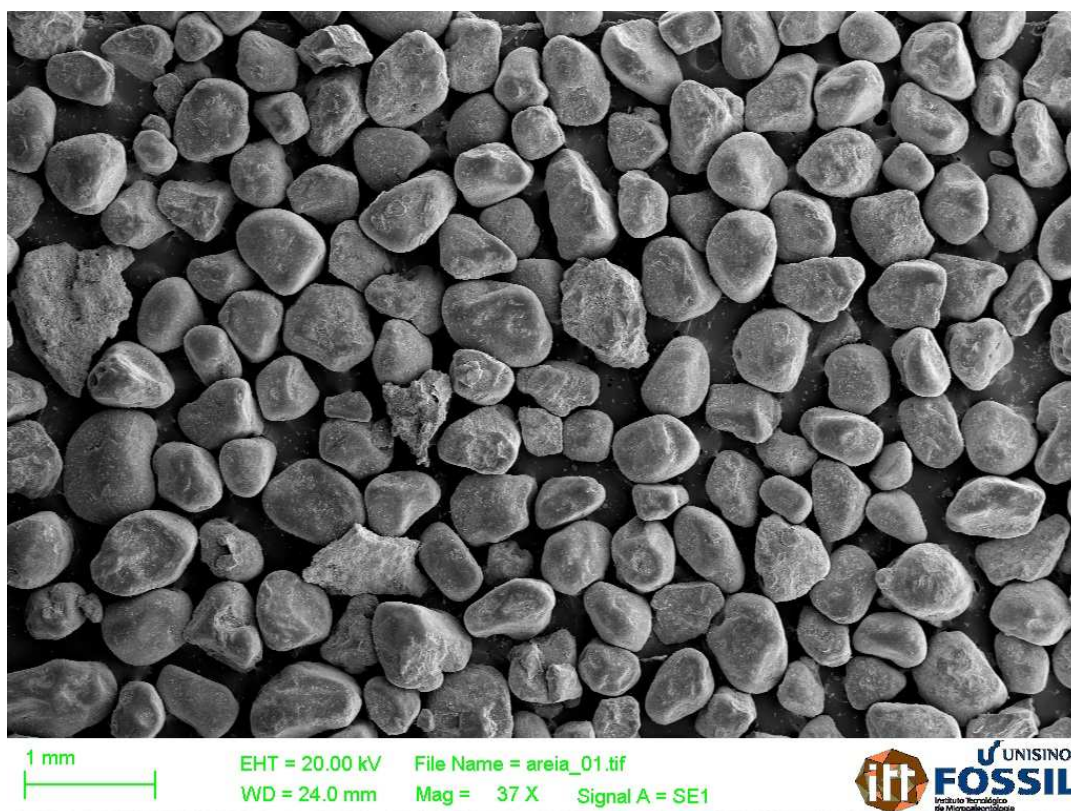


Figura 24 – Amostra de areia 01 observada no MEV

A partir da imagem obtida no microscópio foi utilizado o software ImageJ 1.48v para tratamento e análise da esfericidade média. A imagem original foi convertida primeiramente



para binária, conforme Figura 25, sendo então removidas as partículas sobrepostas ou incompletas, resultando na Figura 26.

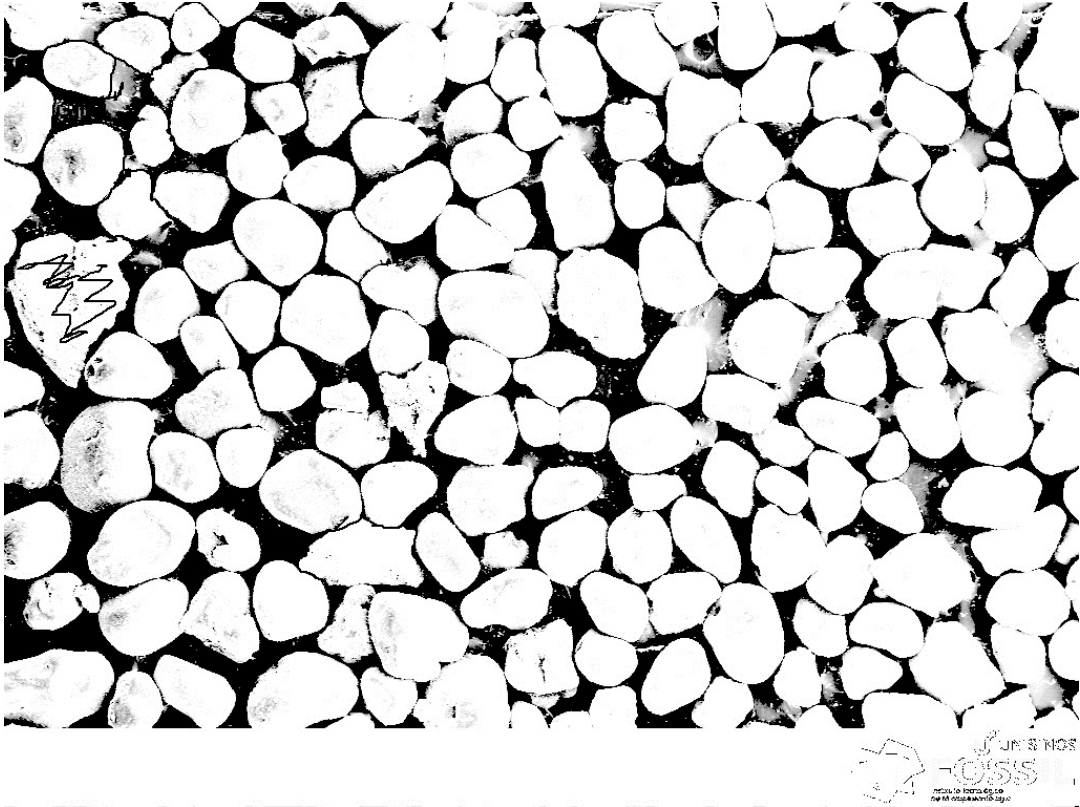


Figura 25 – Imagem convertida para binária

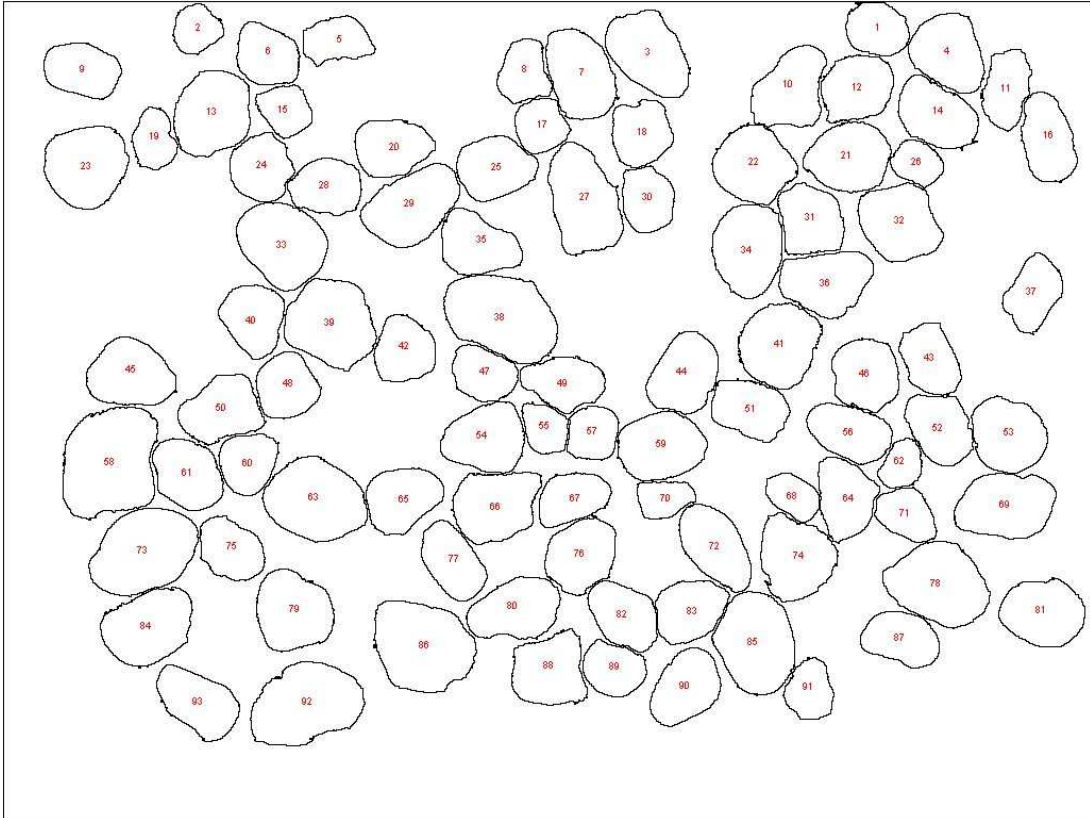


Figura 26 – Polígonos formados a partir da imagem binária

O software identifica os polígonos formados e faz a leitura do maior diâmetro inscrito ( $d_{ei}$ ) e do maior diâmetro circunscrito ( $d_{ec}$ ) de cada polígono. Através da equação (26) de Massarani e Peçanha (1986) foi determinada a esfericidade de cada polígono e então a esfericidade média da amostra de areia.

### 3.2 Bancada de fluidização

Para realização dos experimentos fluidodinâmicos, foi projetada uma bancada de leito fluidizado, conforme Figura 27.

A bancada foi projetada com base nas dimensões de leitos utilizados por diversos autores, conforme pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões de leitos fluidizados utilizados por diversos autores

<b>Autor</b>	<b>Material da coluna</b>	<b>Diâmetro interno da coluna [mm]</b>	<b>Altura da coluna [m]</b>
Chiba, Chiba, <i>et al.</i> (1979)	Acrílico	50	-
Formisani, Cristofaro e Girimonte (2001)	Acrílico	101	-
Reina, Velo e Puigjaner (2000)	Vidro	51	1
Rao e Bheemarasetti (2001)	-	50	-
Abdullah, Husain e Yin Pong (2003)	-	60	0,63
Tannous e Lourenço, 2015	Acrílico	92	2
Paudel e Feng (2013)	Acrílico	145	1
Fotovat, Chaouki e Bergthorson (2013)	Acrílico	152	-
Pecora, Avila, <i>et al.</i> (2014)	Vidro	100	2,5

Os autores Reina, Velo e Puigjaner (2000), Rao e Bheemarasetti (2001), Abdullah, Husain e Yin Pong (2003), Basu (2006), Fotovat, Chaouki e Bergthorson (2013), Pécora, Ávila, *et al.* (2014) e Tannous e Lourenço (2015) utilizaram diferentes biomassas em seus experimentos e ar comprimido como fluido para a fluidização.

O equipamento utilizado neste trabalho foi confeccionado a partir de um tubo cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 94 mm e parede de 3 mm de espessura (4). O tubo foi bipartido e unificado com flanges para facilitar a montagem do leito. Em uma das extremidades, foi instalado um flange, que é fixado na parte metálica do equipamento.

A parte inferior do leito, chamada distribuidor, é constituída de um tubo cilíndrico de aço inox, com comprimento de 100 mm (6). Abaixo deste cilindro foi instalado um semicone (8) por onde é insuflado o ar para fluidização. Nas extremidades inferior (7) e superior (5) do

distribuidor, foram instaladas telas metálicas, de tamanho de malha conhecido. A tela na posição 05 na Figura 27, serve para sustentar o material adicionado no leito.

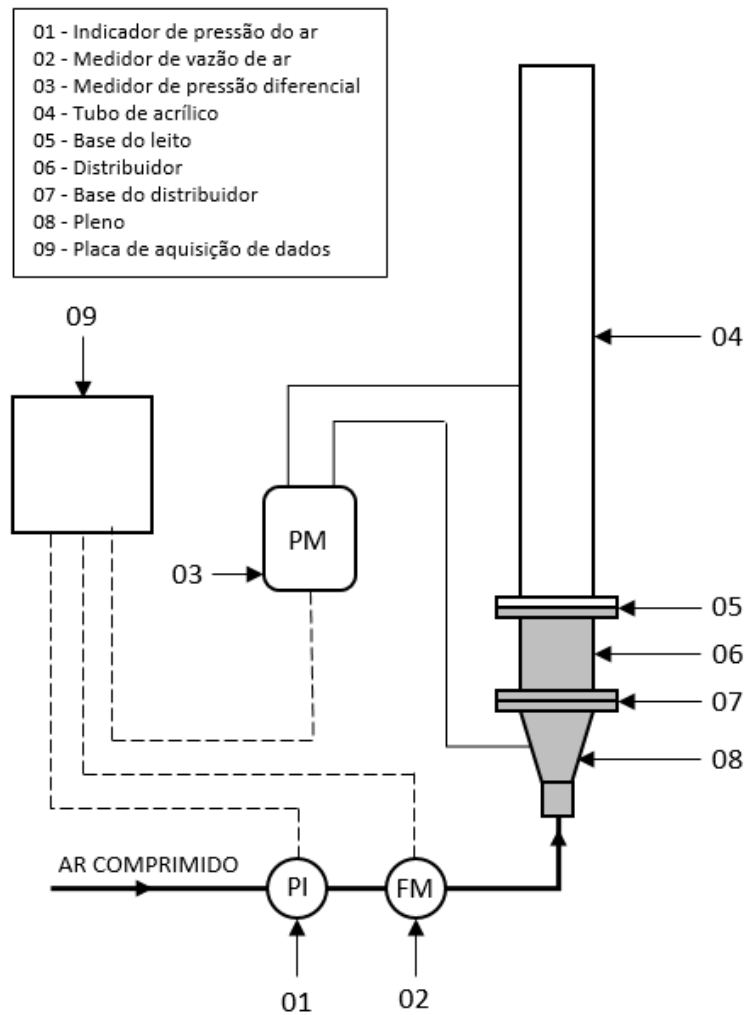


Figura 27 – Equipamento de fluidização de bancada

Entre as telas, indicadas nas posições 05 e 07 na Figura 27, foram colocadas esferas de vidro com o objetivo de homogeneizar o fluxo de ar. As esferas foram dispostas de forma aleatória conforme pode ser observado na Figura 28.



Figura 28 – Esferas de vidro para formar o distribuidor do leito

### 3.2.1 Medição de vazão e velocidade do ar

Para medição da vazão de ar comprimido injetado no leito foi utilizado um medidor da marca IFM, modelo SD6050. O medidor possui uma faixa de medição de 0,2 a 75 Nm<sup>3</sup>/h com precisão de  $\pm 1,5\%$  e saída de sinal analógico de 4 a 20 mA.

Através da medição da vazão total de ar comprimido, é possível calcular o valor médio da velocidade de fluidização normal à seção transversal interna do tubo de acrílico.

### 3.2.2 Medição de pressão diferencial

A medição da pressão diferencial é utilizada para determinar a queda de pressão no leito. As tomadas de pressão foram feitas na parte inferior do leito e após a coluna de material a ser fluidizado com diâmetros de 1 mm. Na Figura 29 pode ser observado o detalhe da tomada de pressão.



Figura 29 – Tomada de pressão no leito

Para medição desta pressão diferencial foi utilizado um instrumento da marca NOVUS, modelo HUBA 699, com faixa de medição ajustável entre 0 a 16 mbar, 0 a 25 mbar e 0 a 50 mbar.

### 3.2.3 Sistema de aquisição de dados

Para coleta de dados, foi utilizada uma placa de coleta de dados da marca NOVUS, modelo Fieldlogger. O equipamento possui 8 entradas analógicas e possui conexão USB para transmissão de dados para o PC.

Os instrumentos são conectados à placa através de cabos e alimentados com uma fonte estabilizada. Todos os dados são coletados ao mesmo tempo permitindo assim a análise do comportamento da perda de pressão no leito em função da vazão de ar.

## 3.3 Procedimento experimental

Neste trabalho, foram realizados experimentos de fluidização com casca de eucalipto, casca de pinus, dois tipos de areia individualmente e de misturas binárias entre biomassa e inerte sendo as frações de biomassa de 20%, 30%, 40%, 60% e 80% do volume total da mistura. Os experimentos foram avaliados de forma quantitativa e qualitativa e registrados por imagens.

Os principais resultados investigados dos materiais individualmente e das misturas binárias foram:

- expansão do leito versus a velocidade superficial do ar;
- porosidade de leito no estado de mínima fluidização;

- velocidades características de fluidização.

Para facilitar a identificação das amostras, foi criado o seguinte código:

**A0m.nz**

onde  $m$  corresponde ao tipo de areia, 1 ou 2,  $n$  corresponde a quantidade de biomassa em volume e  $z$  a inicial da biomassa correspondente, P para pinus e E para eucalipto.

### 3.3.1 Avaliação das misturas binárias

Com o diâmetro interno do leito ( $D$ ) igual a 94 mm, foi calculada a área de seção e multiplicado pela altura de  $H = 94$  mm determinando assim o volume total (VT) necessário para garantir a relação  $H/D \approx 1$ . Utilizando as massas específicas aparentes de cada material, o percentual em volume desejado para cada biomassa e o VT, foram determinadas as massas teóricas de areia e de biomassa de cada mistura. As quantidades de inerte ( $\chi_i$ ) e biomassa ( $\chi_b$ ) foram então pesadas e misturadas e os resultados são observados nas, Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 10 – Composição das misturas de areia 01 e eucalipto

Mistura	% real de volume de biomassa	Massas			$\chi_{be}$ [% ] (eucalipto)
		Areia 01 [g]	Eucalipto [g]	Massa total [g]	
A01.20E	20,10%	830,22	12,01	842,23	1,43%
A01.30E	30,16%	725,13	18,01	743,14	2,42%
A01.40E	40,04%	625,10	24,01	649,11	3,70%
A01.60E	60,41%	414,58	36,38	450,96	8,07%
A01.80E	80,27%	207,37	48,50	255,87	18,96%

Tabela 11 – Composição das misturas de areia 01 e pinus

Mistura	% real de volume de biomassa	Massas			$\chi_{bp}$ [% ] (pinus)
		Areia 01 [g]	Pinus [g]	Massa total [g]	
A01.20P	20,14%	829,14	37,06	866,20	4,28%
A01.30P	33,60%	725,14	65,04	790,18	8,23%
A01.40P	40,41%	621,82	74,75	696,57	10,73%
A01.60P	60,45%	414,66	112,31	526,97	21,31%
A01.80P	80,27%	207,46	149,57	357,03	41,89%

Tabela 12 – Composição das misturas de areia 02 e eucalipto

Mistura	% real de volume de biomassa	Massas			$\chi_{be}$ [% ] (eucalipto)
		Areia 02 [g]	Eucalipto [g]	Massa total [g]	
A02.20E	20,17%	833,47	12,24	845,71	1,45%
A02.30E	30,14%	730,06	18,31	748,37	2,45%
A02.40E	40,79%	626,04	25,07	651,11	3,85%
A02.60E	60,01%	417,15	36,40	453,55	8,03%
A02.80E	79,98%	208,40	48,39	256,79	18,84%

Tabela 13 – Composição das misturas de areia 02 e pinus

Mistura	% real de volume de biomassa	Massas			$\chi_{bp}$ [% ] (pinus)
		Areia 02 [g]	Pinus [g]	Massa total [g]	
A02.20P	19,34%	871,51	37,44	908,94	4,12%
A02.30P	30,03%	729,96	56,14	786,10	7,14%
A02.40P	40,03%	625,80	74,86	700,66	10,68%
A02.60P	60,00%	417,06	112,11	529,17	21,19%
A02.80P	80,04%	208,06	149,48	357,54	41,81%

### 3.3.2 Determinação da curva de fluidização e expansão do leito

As amostras foram colocadas no leito e a vazão de ar foi elevada ao máximo possível (em torno de 20 Nm<sup>3</sup>/h), a fim de misturar os componentes. Após 10 s aproximadamente, o escoamento de ar foi reduzido a zero abruptamente e então gradativamente aumentado para registrar a curva de fluidização.

A partir da vazão de gás zero a válvula de controle de fluxo foi aberta gradualmente até que o gás atingisse a sua vazão máxima. A cada 1 s o diferencial de pressão foi registrado pela placa de aquisição de dados, gerando assim a curva de fluidização. A abertura da válvula reguladora de fluxo foi realizada de forma rápida e de forma lenta, porém em ambos os casos os resultados não apresentaram diferença nas curvas. Além disso, foram registradas as curvas de fluidização (incremento de vazão de gás) e de defluidização (redução gradual da vazão de gás).



A cada incremento de vazão foi registrada a altura média do leito a fim de determinar a sua expansão nas diversas condições de fluidização, conforme exemplo na Tabela 14, onde,  $u_0$  é a velocidade do gás dentro do leito,  $Q$  a vazão de gás,  $H1$ ,  $H2$  e  $H3$  as alturas medidas,  $H_m$  a altura média para cada velocidade do gás.

Tabela 14 – Altura do leito para cada vazão de gás

$u_0$ [m/s]	$Q$ [m <sup>3</sup> /h]	H1 [cm]	H2 [cm]	H3 [cm]	$H_m$ [cm]
0,00	0,00	9,5	10,0	10,0	9,83
0,10	2,50	11,0	10,5	10,5	10,67
0,20	5,00	11,5	11,0	11,0	11,17
0,30	7,49	12,0	11,5	11,5	11,67
0,40	9,99	12,0	11,5	11,5	11,67
0,50	12,49	12,5	12,0	12,0	12,17
0,60	14,99	13,0	12,5	13,0	12,83
0,70	17,49	13,5	13,5	13,5	13,50
0,80	19,99	14,0	14,0	14,0	14,00

Segundo Thonglimp, Hiquily e Laguerie (1984), a porosidade do leito pode ser definida como a razão entre o volume de vazios entre as partículas da amostra pelo volume total ocupado pelo componente ou mistura, conforme a equação (29).

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{AH_m} \left( \frac{m_i}{\rho_{apa}} + \frac{m_b}{\rho_{apb}} \right) \quad (29)$$

onde  $A$  é a área de seção interna do leito,  $H_m$  é a altura média durante a fluidização em função da velocidade do gás,  $m_i$  e  $m_b$  são as massas de inerte e de biomassa, respectivamente, e  $\rho_{apa}$  e  $\rho_{apb}$  são as massas específicas aparentes da areia e da biomassa, respectivamente.

No caso de avaliação dos componentes individualmente, foi utilizada uma massa tal que seu volume no leito mantivesse a proporção de  $H/D \approx 1$ , onde  $H$  é a altura e  $D$  o diâmetro interno do leito. O mesmo procedimento descrito anteriormente foi utilizado para avaliar a

fluidodinâmica. Este procedimento foi realizado em triplicata para cada mistura e cada particulado e durante a realização dos experimentos foram registradas algumas imagens.

### 3.3.3 Determinação das velocidades características

As velocidades características das amostras homogêneas e das misturas binárias foram determinadas utilizando o método de queda de pressão a partir da elaboração dos gráficos que relacionam a velocidade do fluido e a queda de pressão no leito.

Estas velocidades foram identificadas segundo a classificação de Mourad, Hemati e Laguerie (1994):

- $u_{fi}$ , velocidade de fluidização inicial. Quando ocorrem os primeiros movimentos das partículas;
- $u_{fa}$ , velocidade de fluidização aparente. Identificada entre a velocidade de fluidização inicial e a segregação das partículas.
- $u_{fc}$ , velocidade de fluidização completa. É a velocidade do leito no estado fluidizado, quando a biomassa é completamente sustentada pelo inerte.

A velocidade de mínima fluidização ou velocidade aparente de fluidização, é determinada pela intersecção entre uma reta ao longo da região de leito fixo ( $\epsilon_{mf}$ ) com a linha de queda de pressão constante após a fluidização, identificado como ponto A na Figura 30 e também no ponto de máxima perda de pressão, observado na curva de fluidização da Figura 30.

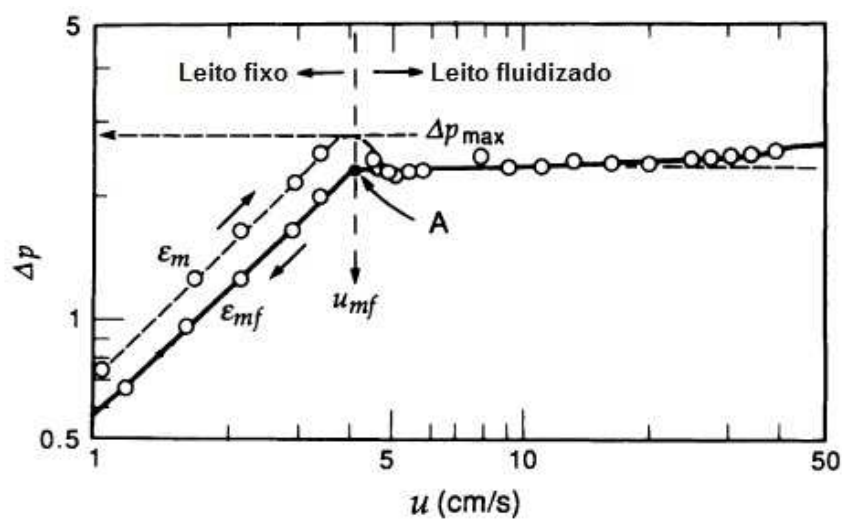


Figura 30 – Curva de fluidização/defluidização característica de particulado homogêneo

Fonte: Adaptado de (KUNII e LEVENSPIEL, 1991)

### 3.3.4 Determinação da curva de queda de pressão do sistema a vazio

Conforme explicado no item 3.3, os pontos para medição da queda de pressão gerada pelos materiais, considera a queda de pressão do leito também, portanto foi determinada a curva de queda de pressão do leito a vazio.

Com o leito a vazio, a vazão de gás foi sendo aumentada gradualmente e o diferencial de pressão foi sendo registrado pela placa de aquisição de dados a cada incremento desta vazão. Este procedimento foi realizado em triplicata. A Figura 31 mostra a curva de queda de pressão do sistema a vazio.

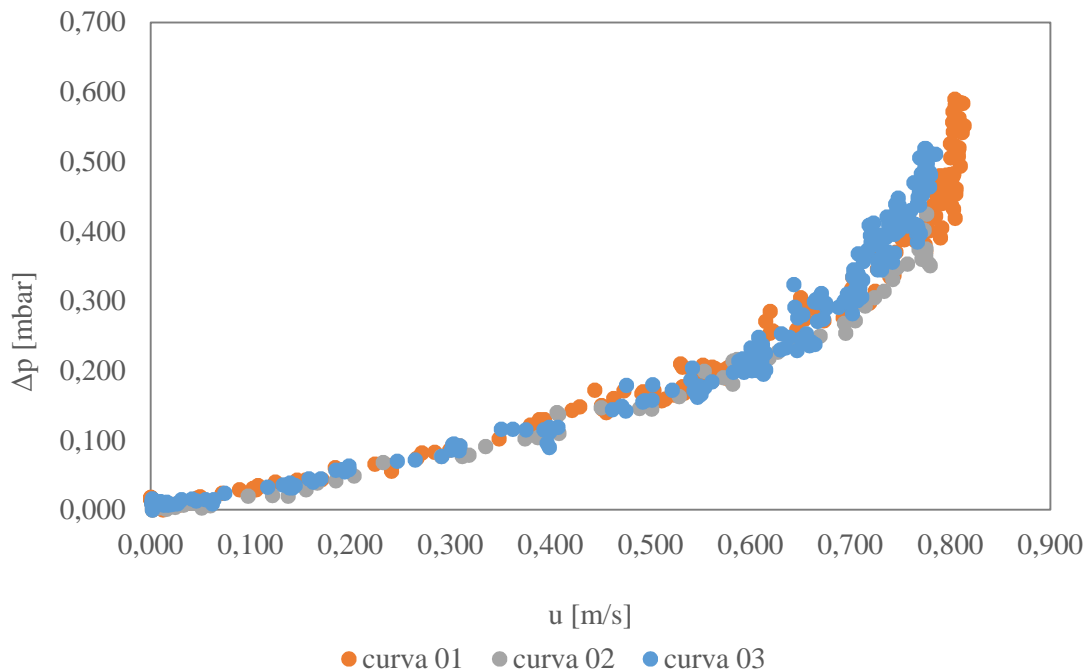


Figura 31 – Dados de queda de pressão do leito a vazio

A partir dos dados foi então obtida a equação de ajuste da curva, conforme Figura 32.

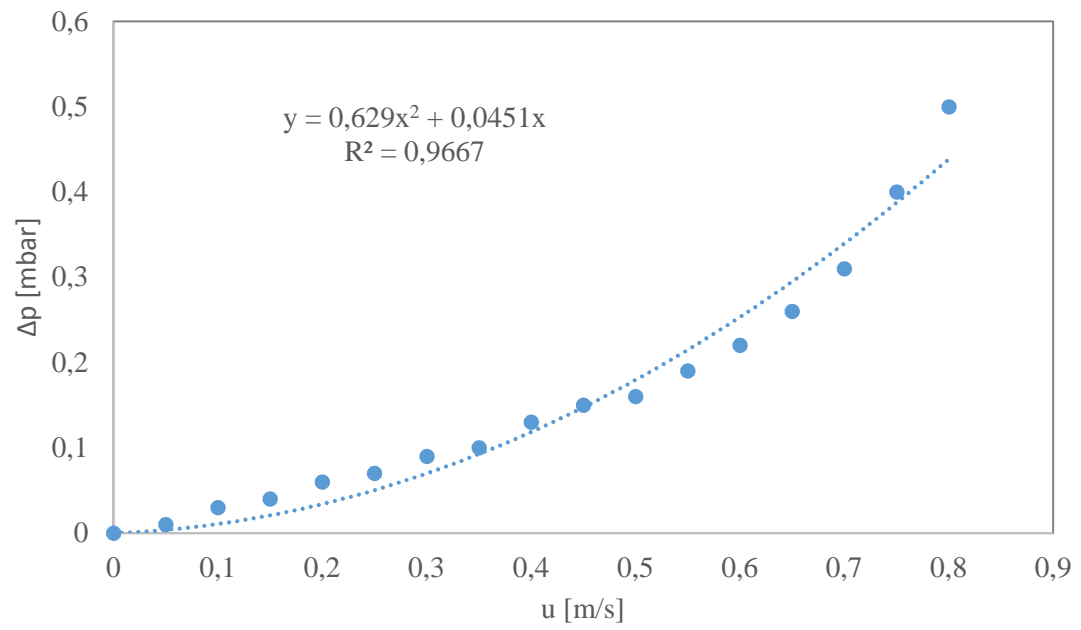


Figura 32 – Curva final de queda de pressão do leito a vazio

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios para caracterização dos materiais e também a análise das curvas de fluidização e defluidização geradas a partir dos experimentos no leito de bancada projetado para este trabalho.

### 4.1 Caracterização física dos componentes

Na Tabela 15, é apresentado um resumo da caracterização dos componentes utilizados. Estes resultados serão utilizados para avaliar o comportamento fluidodinâmico dos particulados individualmente e das misturas entre inerte e biomassa.

Tabela 15 – Características das amostras

Amostras	$d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\rho_p$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	$\rho_{ap}$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	$\epsilon_0$	$\phi_s$	Classificação de Geldart
Areia 01	$288,91 \pm 0,88$	$2,670 \pm 8,9 \times 10^{-4}$	$1,616 \pm 0,044$	0,39	0,72	B
Areia 02	$220,43 \pm 7,83$	$2,639 \pm 8,0 \times 10^{-4}$	$1,598 \pm 0,022$	0,39	-	B
Eucalipto	$537,50 \pm 3,27$	$1,386 \pm 5,5 \times 10^{-3}$	$0,093 \pm 0,0026$	0,93	-	B
Pinus	$579,13 \pm 2,30$	$1,271 \pm 1,1 \times 10^{-3}$	$0,286 \pm 0,029$	0,77	-	B

Na Tabela 16 são apresentadas as medidas A e B de três aberturas da peneira utilizada na análise granulométrica das partículas de casca de eucalipto.

Tabela 16 – Dimensões das aberturas da tela

Dimensões	Abertura 01 [ $\mu\text{m}$ ]	Abertura 02 [ $\mu\text{m}$ ]	Abertura 03 [ $\mu\text{m}$ ]
A	510	534	526
B	557	549	549
Média	533,5	541,5	537,5

A abertura média da tela calculada foi 537,5  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 33 é apresentada a distribuição granulométrica da areia 01 que resultou em um tamanho médio de partícula ( $\bar{d}_{pa1}$ ) de  $288,91 \pm 0,88 \mu\text{m}$ .

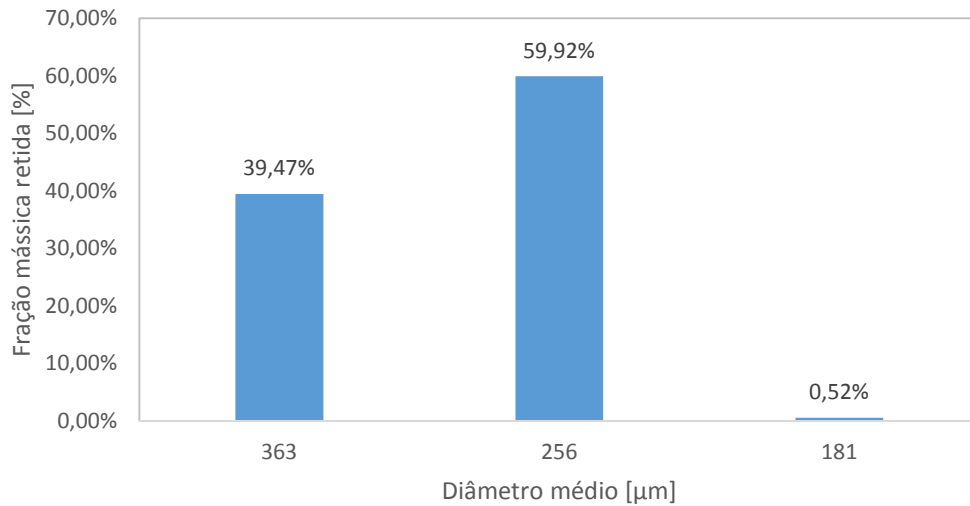


Figura 33 – Distribuição granulométrica da areia 01

A granulometria da areia 02 é indicada na Figura 34. O diâmetro médio de partícula ( $\bar{d}_{pa2}$ ) determinado foi de  $220,43 \pm 7,83 \mu\text{m}$ .

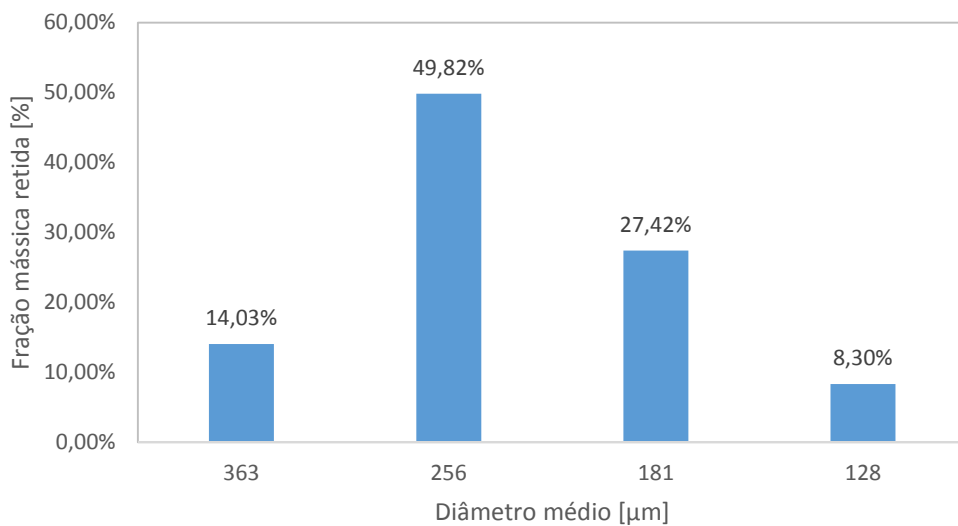


Figura 34 – Distribuição granulométrica da areia 02

Na análise granulométrica do pinus, Figura 35, é possível observar uma maior concentração de partículas na faixa entre 2525  $\mu\text{m}$  e 181  $\mu\text{m}$ , resultando em um tamanho médio ( $\bar{d}_{pp}$ ) de  $579,13 \pm 2,30 \mu\text{m}$ .

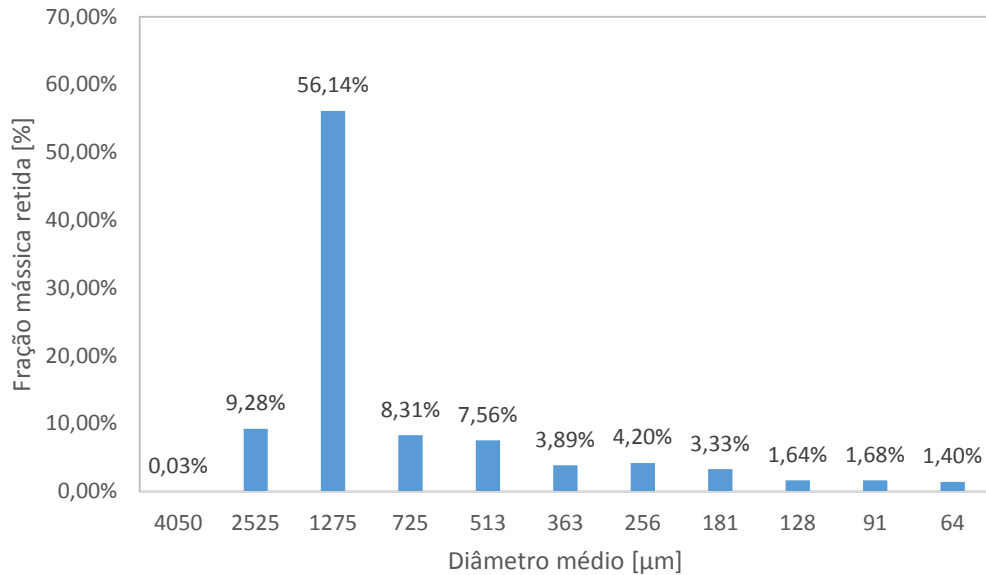


Figura 35 – Distribuição granulométrica do pinus

Observa-se a grande diferença entre as massas específicas real e aparente das biomassas, Tabela 15. Estas diferenças devem-se principalmente ao formato irregular das partículas que permitem a formação de espaços vazios entre elas. Na Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39 é possível observar estas características.



Figura 36 – Partículas de eucalipto

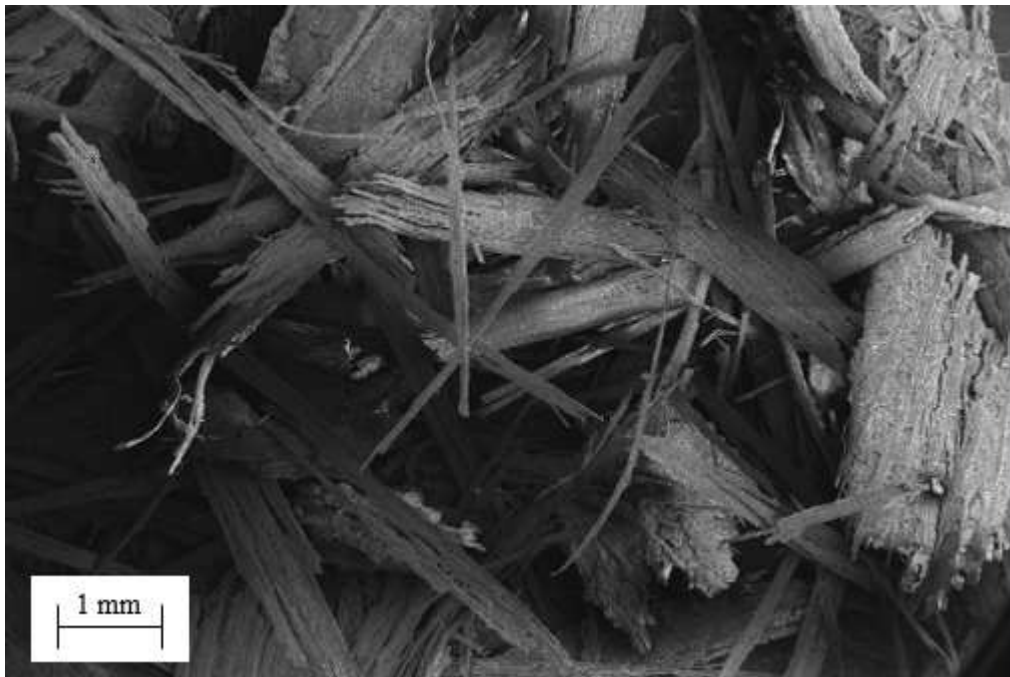


Figura 37 – Partículas de eucalipto observadas no MEV





Figura 38 – Partículas de pinus

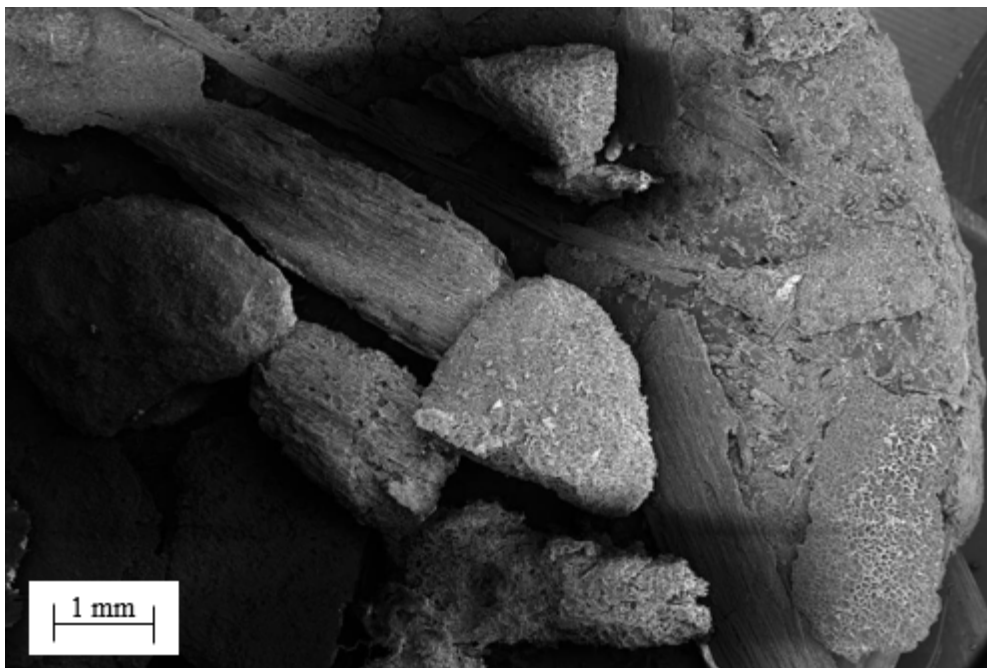


Figura 39 – Partículas de pinus observadas no MEV

Não foi possível determinar as esfericidades das partículas de biomassa em função das irregularidades. A esfericidade da areia ( $\phi_a$ ) foi determinada como valor de 0,74, conforme procedimento descrito no item 3.2.5.

## 4.2 Análise fluidodinâmica

Neste item, são discutidos os resultados das curvas de fluidização e defluidização dos inertes (areia 01 e areia 02) e das diversas misturas de inerte com biomassas.

### 4.2.1 Curvas de fluidização e defluidização das areias

Na Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43 podem ser observadas as curvas de fluidização e defluidização das areias 01 e 02 e suas velocidades de mínima fluidização. No eixo das abscissas pode ser observada a velocidade de escoamento do gás e no eixo das ordenadas é observada a perda de pressão através do leito.

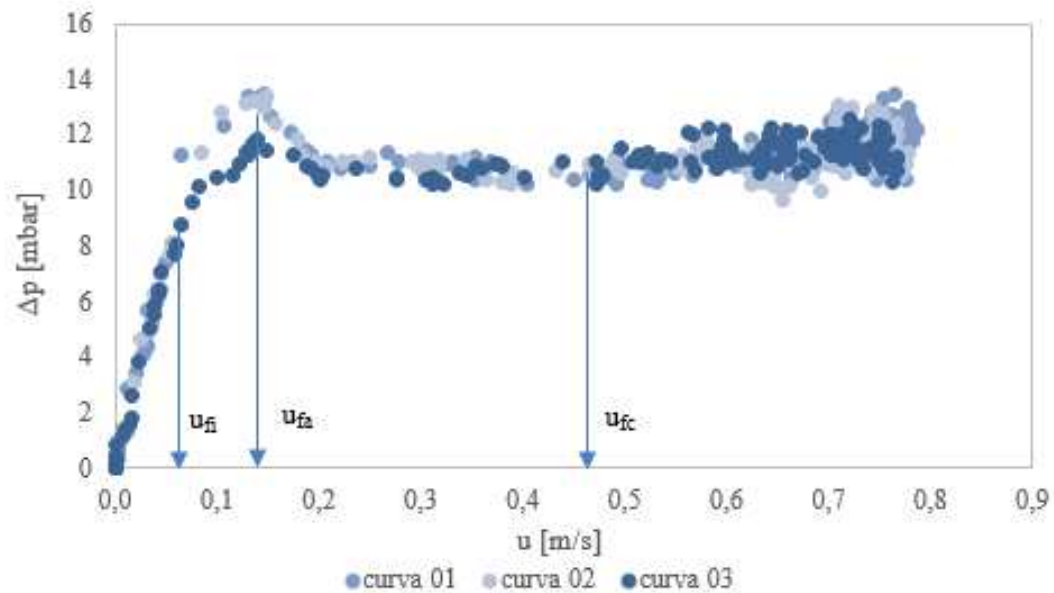


Figura 40 – Curva de fluidização da areia 01

$$u_{fa} = 0,148 \text{ m/s}$$

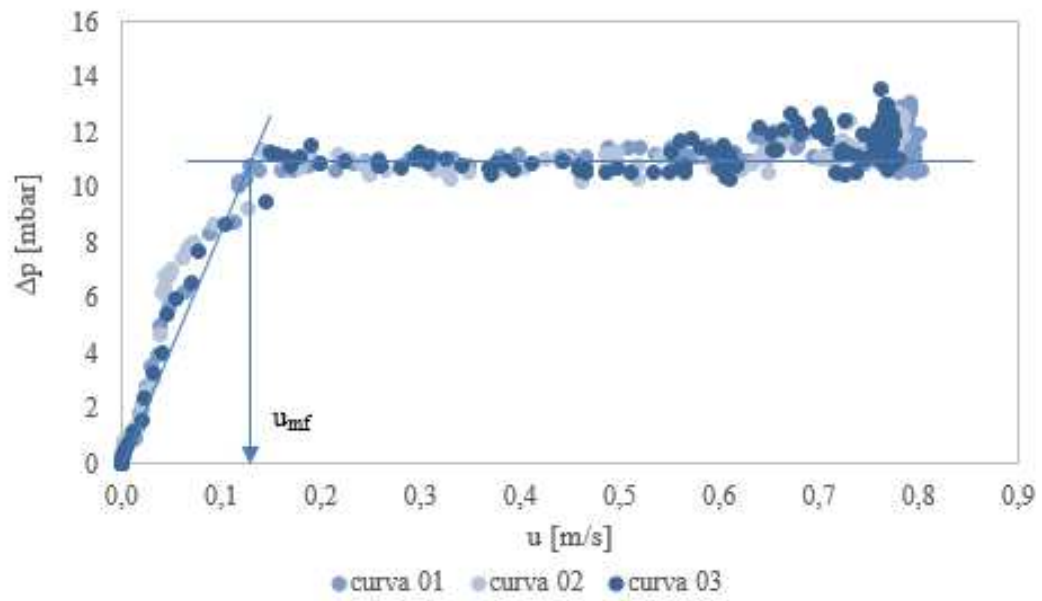


Figura 41 – Curva de defluidização da areia 01

$$u_{mf} = 0,138 \text{ m/s}$$

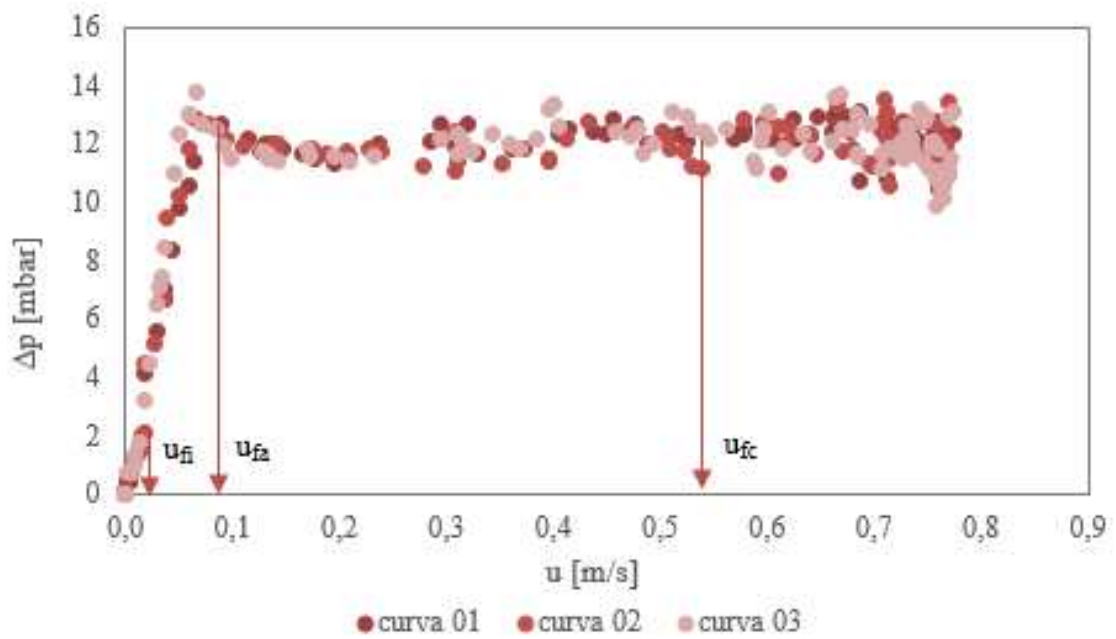


Figura 42 – Curva de fluidização da areia 02

$$u_{fa} = 0,09 \text{ m/s}$$

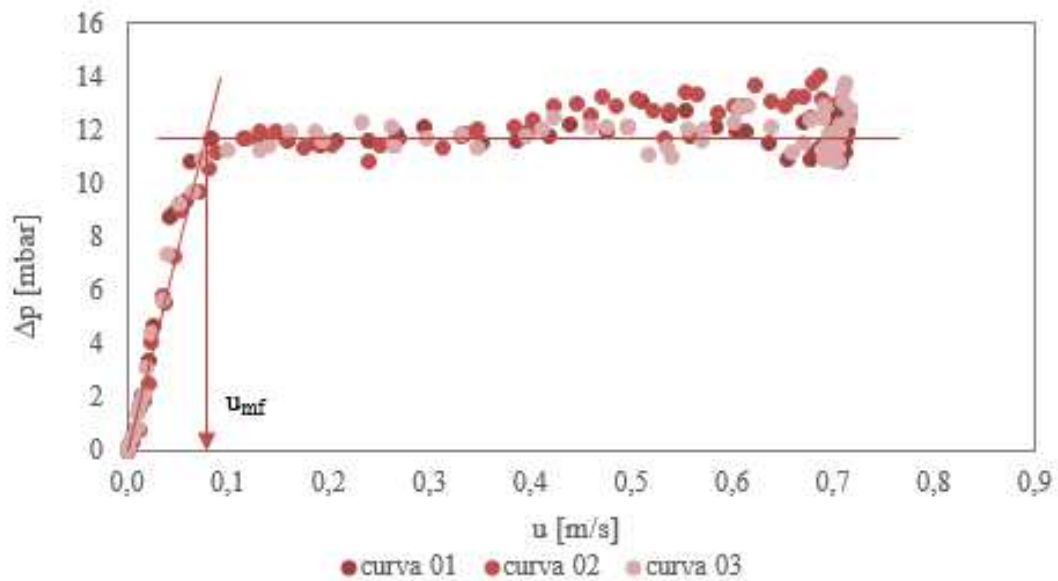


Figura 43 - Curva de defluidização da areia 02

$$u_{mf} = 0,089 \text{ m/s}$$

Pode-se observar que a areia 01, que possui um tamanho médio de partículas maior que a areia 02, apresenta uma velocidade de mínima fluidização superior em relação à areia 02, porém apresenta uma perda de pressão inferior. Estas diferenças ocorrem devido à maior facilidade de escoamento do gás através da areia 01 em relação à areia 02.

#### 4.2.2 Curvas de fluidização e defluidização das misturas

Neste item são apresentadas as curvas de fluidização e defluidização das misturas de inerte com biomassa. Em cada gráfico foram identificadas as velocidades características da mistura.

A velocidade de fluidização inicial ( $u_{fi}$ ) ocorre no momento em que algumas partículas começam a se movimentar. A velocidade de fluidização aparente ( $u_{fa}$ ), relacionada com a velocidade de mínima fluidização em sistemas homogêneos, é o ponto onde o leito passa do estado fixo para fluidizado. Por último ocorre a velocidade de fluidização completa ( $u_{fc}$ ), onde ambos os componentes (inerte e biomassa) passam para o estado fluidizado.

##### 4.2.2.1 Curvas das misturas de eucalipto com areia

Na Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49, e Figura 50 são apresentadas as curvas de fluidização e defluidização das misturas binárias compostas da areia

e biomassa. No eixo das abscissas está indicada a velocidade de escoamento do gás e no eixo das ordenadas é apresentada a perda de pressão gerada pelo leito durante o escoamento do gás.

Nas Figura 44 (a) e 44 (b) são apresentadas as curvas das misturas compostas por areia 01 e 1,43% de massa de eucalipto, nas Figuras 45 (a) e 45 (b) areia 01 com 2,42% de massa de eucalipto e nas Figuras 45 (c) e 45 (d), areia 01 com 3,7% de massa de eucalipto

Observa-se que, com o aumento gradual da velocidade do gás, em um primeiro momento ocorre a expansão do leito e em seguida são formados pequenos canais através dos quais o gás inicia o transporte de pequenas partículas até a superfície do leito. Este ponto é registrado como a velocidade de fluidização inicial. Neste momento ocorre também uma pequena variação na perda de pressão do sistema, que pode ser observada na Figura 44 e Figura 45, onde está indicada a  $u_{fi}$ .

Aumentando ainda mais a velocidade do gás, começam a se formar algumas bolhas do gás na mistura, que atravessam o leito e arrastam o material mais leve para a superfície, iniciando assim a fluidização da mistura. Aqui é observada uma pequena segregação entre a biomassa e a areia, principalmente para misturas com a concentração maior de biomassa.

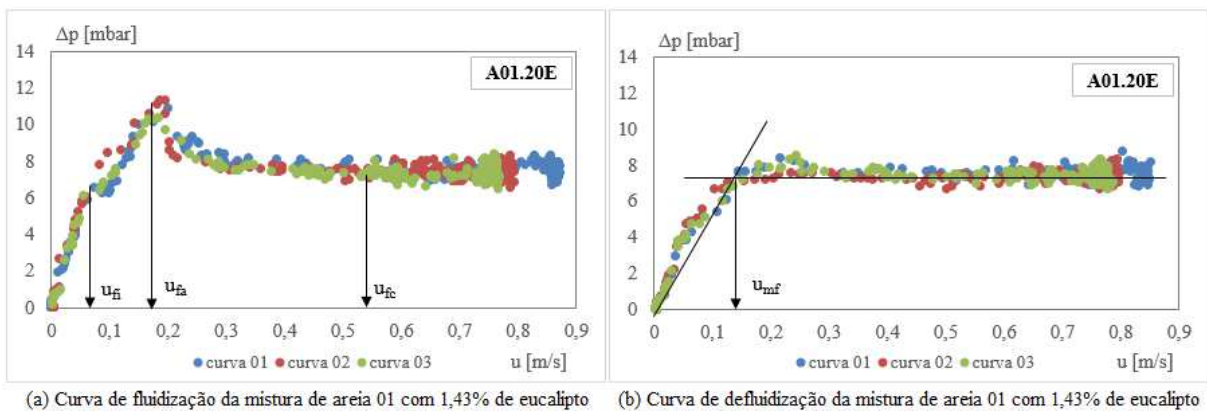


Figura 44 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e eucalipto com concentração de 20% do volume de biomassa.

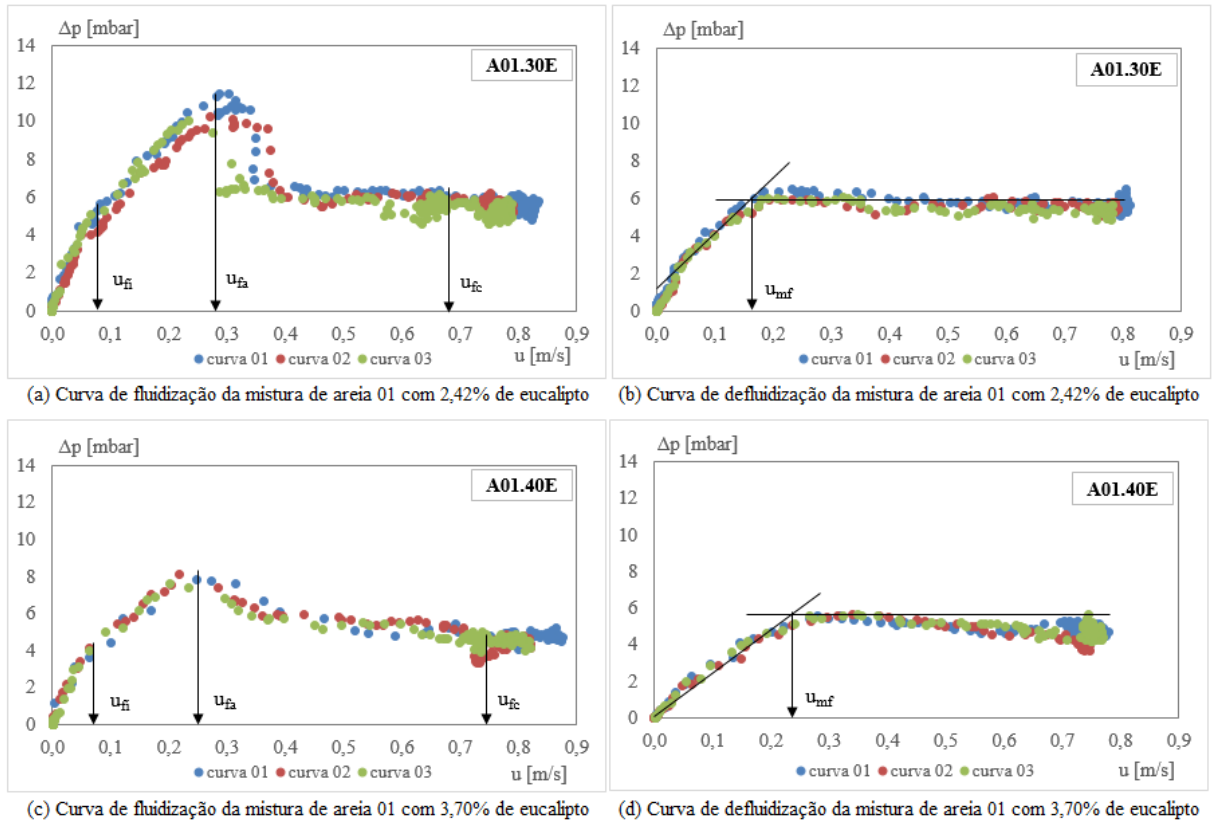


Figura 45 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e eucalipto com concentrações de 30% e 40% do volume de biomassa.

Foi possível observar que a velocidade de mínima fluidização aumenta com o aumento da fração em massa de eucalipto na mistura, porém a perda de pressão diminui ou tende a se manter no mesmo patamar. Este comportamento ocorre devido ao aumento dos canais preferenciais criados pelo ar. Como o eucalipto apresenta uma massa específica aparente muito baixa, mantém-se entre as partículas espaços vazios, estes facilitam a passagem do ar de fluidização. Desta forma, é necessária uma velocidade maior para iniciar a fluidização, fazendo com que a velocidade aumente sem necessariamente aumentar a perda de pressão.

Para as misturas com 8,07% e 18,96% de massa de eucalipto, que correspondem às misturas com 60% e 80% em volume de biomassa, respectivamente, não foi possível determinar as curvas de fluidização.

Na Figura 46 e Figura 47 são apresentadas as curvas de fluidização e defluidização das misturas de eucalipto com a areia 02 onde as Figuras 46 (a) e 46 (b) são as misturas compostas por areia 02 e 1,45% de massa de eucalipto, as Figuras 46 (c) e 46 (d) areia 02 e 2,45% de eucalipto e as Figuras 47 (a) e 47 (b) areia 02 com 3,70% de eucalipto.

Para as misturas de de eucalipto com areia 01, foram registradas velocidades características de fluidização menores em relação às misturas de eucalipto com a areia 01.

A mistura A02.20E não apresentou uma variação muito significativa de perda de pressão na velocidade de fluidização inicial. Foi observado que, ao contrário da mistura com areia 01, nesta o gás infiltrou pelo leito de forma mais homogênea, gerando canais preferenciais menores.

A partir da mistura A02.40E, o leito chega à fluidização, porém, devido ao aglomeramento da biomassa com a areia, formam-se os canais preferenciais, fazendo com que a mistura perca a sustentação e se acomode no leito. Na Figura 47 (a) e (b) observa-se que após a ocorrência da velocidade de fluidização aparente, a queda de pressão se reduz abruptamente, devido a este efeito dos canais.

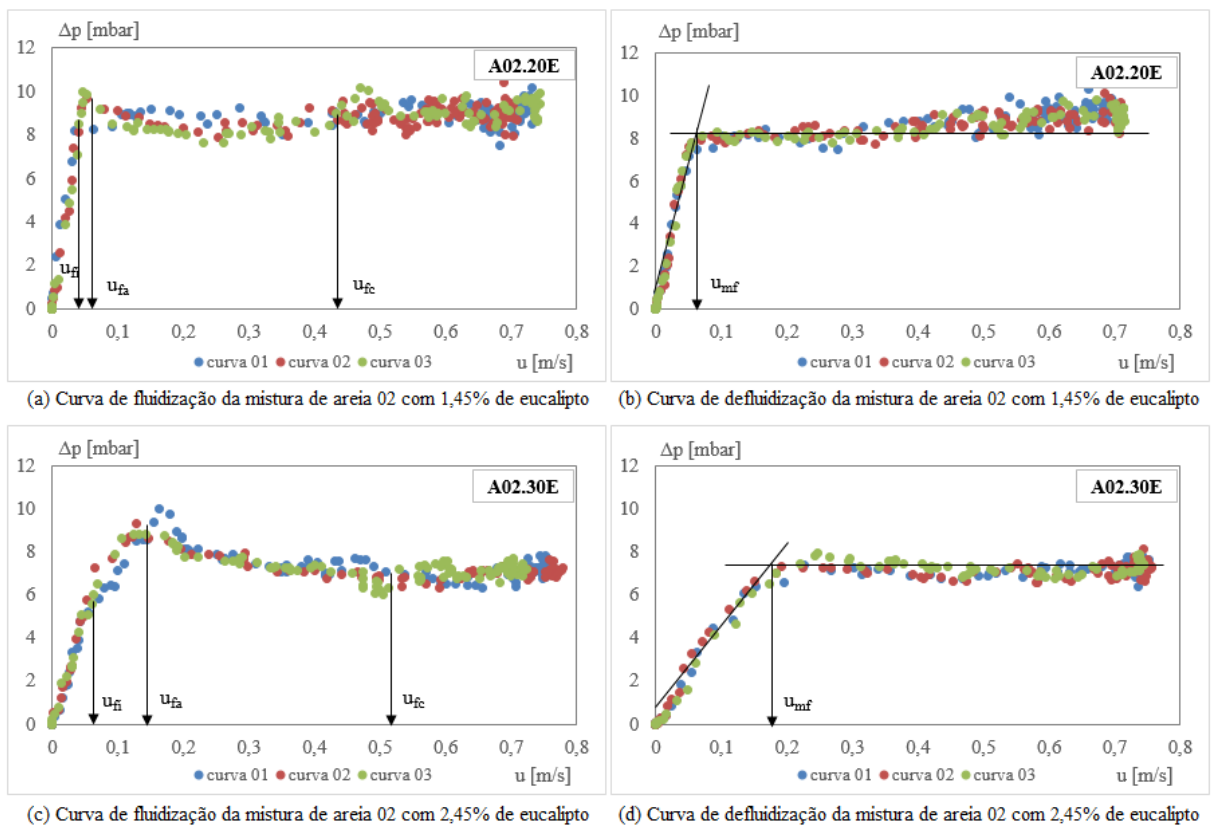


Figura 46 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 02 e eucalipto com concentrações de 20% e 30% do volume de biomassa.

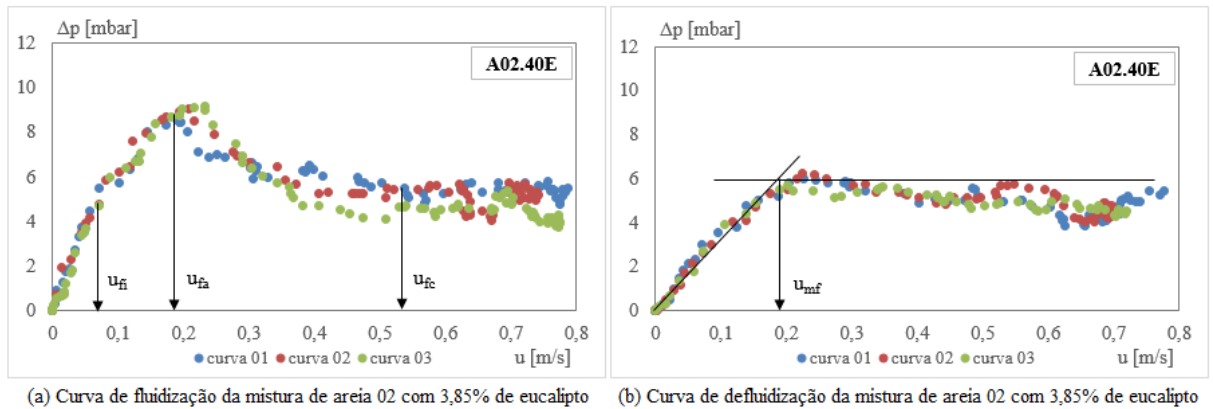


Figura 47 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 02 e eucalipto com concentração de 40% do volume de biomassa.

#### 4.2.2.2 Curvas das misturas de pinus com areia

Na Figura 48 e Figura 49, são apresentadas as curvas de fluidização e defluidização das misturas de areia 01 com pinus. Na Figura 48 (a) e 48 (b) podem ser observadas as curvas de areia 01 com 4,28% de massa de pinus, nas Figuras 49 (a) e 49 (b) areia 01 com 8,23 % de pinus, nas Figuras 49 (c) e 49 (d) areia 01 com 10,73% de pinus e nas Figuras 49 (e) e 49 (f) areia 01 com 21,13% de massa de pinus.

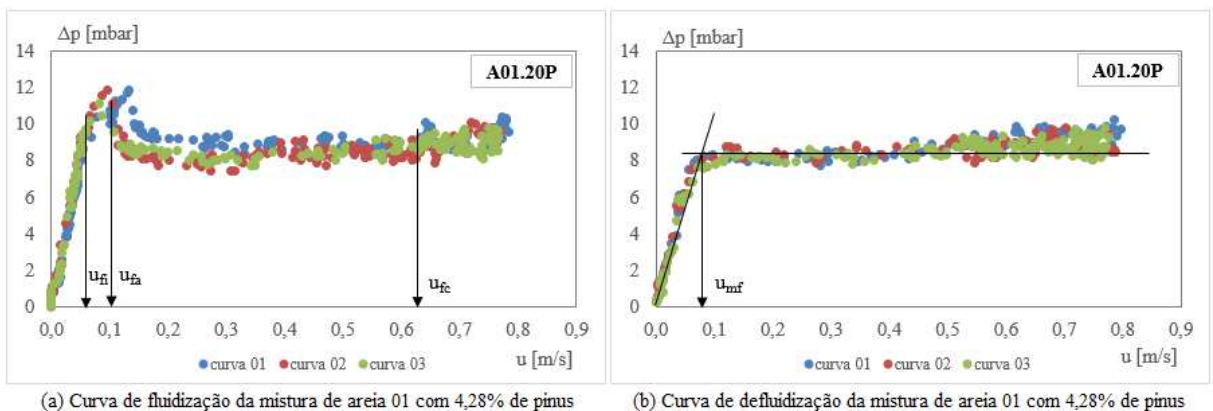


Figura 48 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e pinus com concentração de 20% do volume de biomassa.



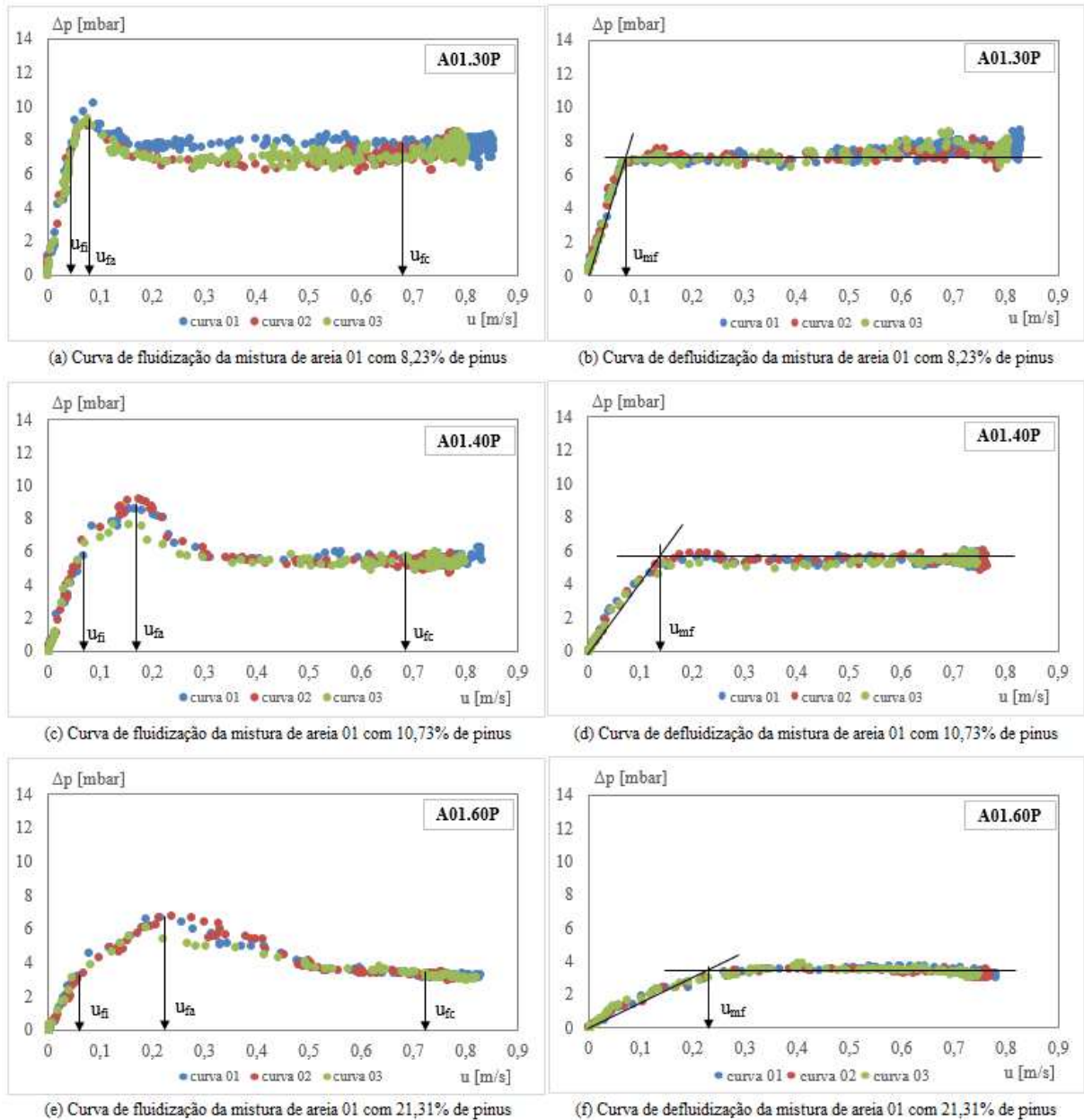


Figura 49 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 01 e pinus com concentrações de 30%, 40% e 60% do volume de biomassa.

Ao contrário das misturas com eucalipto, o pinus apresentou uma facilidade maior em relação à fluidização com areia, porém a segregação é mais evidente nestas misturas.

Na Figura 50, são apresentadas as curvas de fluidização e defluidização das misturas de areia 02 com pinus, tendo-se, nas Figuras 50 (a) e 50 (b), areia 02 e 4,12% de massa de pinus, nas Figuras 50 (c) e 50 (d), areia 02 e 7,14% de pinus, nas Figuras 50 (e) e 50 (f), areia 02 e 10,68% de pinus e nas Figuras 50 (g) e 50 (h), areia 02 e 21,19% de pinus.

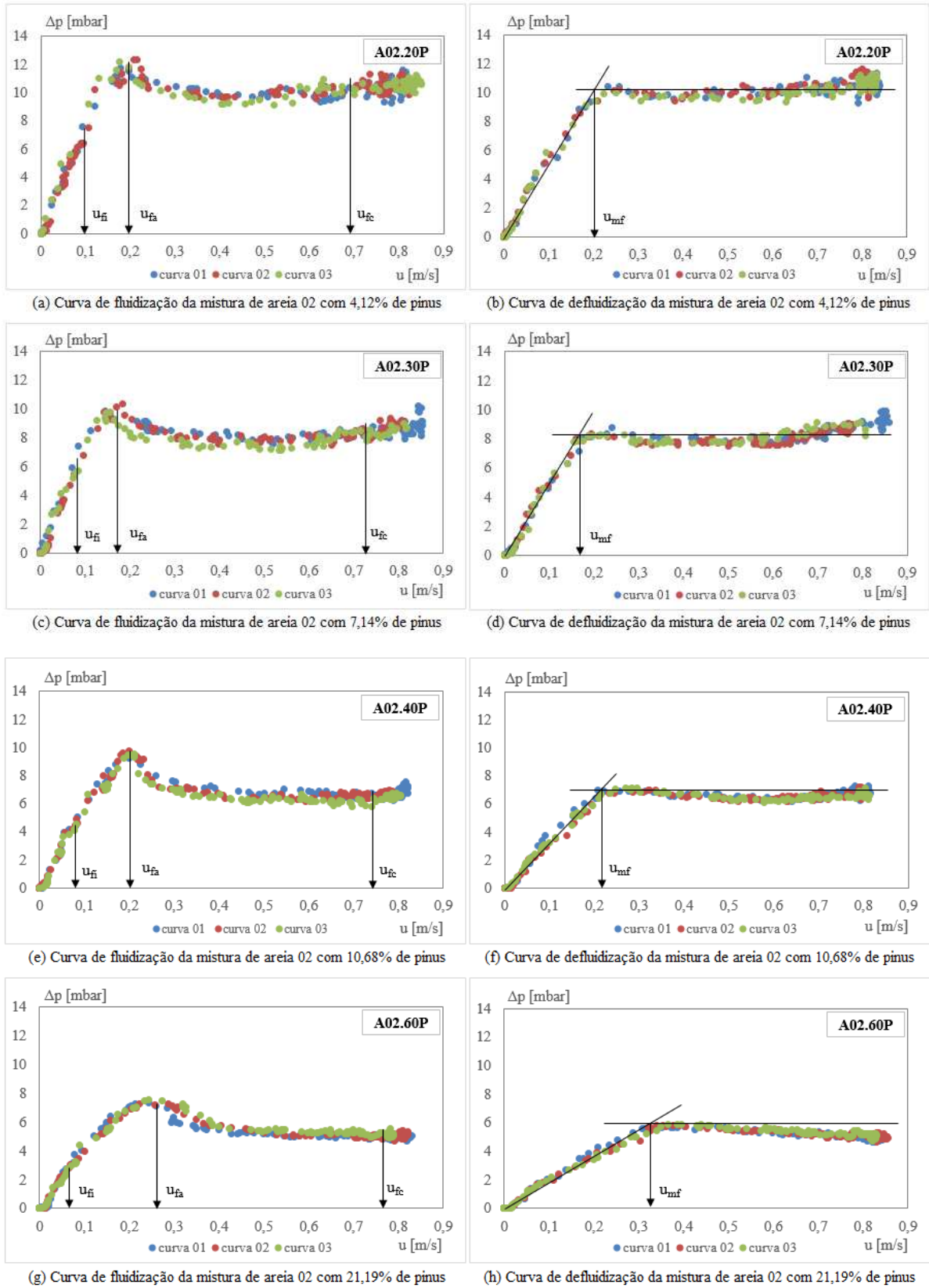


Figura 50 – Curvas de fluidização e defluidização para misturas de areia 02 e pinus com concentrações de 20%, 30%, 40% e 60% do volume de biomassa.

Entre as misturas de pinus com areia 01 e areia 02 é possível observar que as velocidades características sofrem um aumento nas misturas com a areia 02, que possui um tamanho de grão menor em relação à areia 01, facilitando, portanto, a homogeneização do leito. Além disso é possível observar que os patamares de queda de pressão após a fluidização se estabilizam com valores maiores nas misturas com areia 02, sugerindo, portanto, uma menor porosidade no leito.

A partir das misturas A01.60P e A02.60P, surge uma dificuldade maior para fluidizar o leito em função da segregação do pinus. Na Figura 49 (g) e (h) e Figura 50 (g) e (h) se torna evidente este fenômeno, uma vez que a queda de pressão é reduzida gradualmente mesmo com o aumento da velocidade do gás. Na Tabela 17 e Tabela 18 foram resumidas as velocidades características das misturas de biomassa com areia 01 e areia 02.

Tabela 17 - Velocidades características para misturas com areia 01

Componente	$d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\chi_b$ [%]	$u_{fi}$ [m/s]	$u_{fa}$ [m/s]	$u_{mf}$ [m/s]	$u_{fc}$ [m/s]
Areia 01	288,91	0,00%	0,065	0,148	0,138	0,472
Eucalipto	537,50	1,43%	0,074	0,183	0,164	0,547
		2,42%	0,077	0,274	0,233	0,689
		3,70%	0,070	0,247	0,245	0,748
		8,07%	-	-	-	-
		18,96%	-	-	-	-
Pinus	579,13	4,28%	0,055	0,095	0,088	0,633
		8,23%	0,050	0,084	0,079	0,683
		10,73%	0,058	0,147	0,147	0,687
		21,31%	0,045	0,219	0,224	0,724
		41,89%	-	-	-	-

Tabela 18 – Velocidades características para misturas com areia 02

Componente	$d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\chi_b$ [%]	$u_{fi}$ [m/s]	$u_{fa}$ [m/s]	$u_{mf}$ [m/s]	$u_{fc}$ [m/s]
Areia 02	220,43	0,00%	0,014	0,090	0,090	0,542
Eucalipto	537,50	1,45%	0,040	0,072	0,072	0,449
		2,45%	0,063	0,142	0,156	0,512
		3,85%	0,070	0,181	0,185	0,536
		8,07%	-	-	-	-
		18,96%	-	-	-	-
Pinus	579,13	4,12%	0,096	0,198	0,202	0,695
		7,14%	0,085	0,178	0,180	0,728
		10,68%	0,076	0,211	0,223	0,750
		21,19%	0,071	0,274	0,308	0,765
		41,89%	-	-	-	-

#### 4.2.3 Influência da natureza da biomassa na fluidização

Foi observado que duas características são fundamentais para que ocorra uma boa fluidização das misturas de inerte com biomassa: a massa específica aparente e o formato das partículas dos componentes.

No caso da casca de eucalipto e areia, existe uma diferença grande entre as massas específicas aparentes destes particulados, sendo de  $1,616 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,598 \text{ g/cm}^3$  e  $0,093 \text{ g/cm}^3$  para areia 01, areia 02 e casca de eucalipto, respectivamente. Além disso, as partículas de eucalipto possuem um formato próximo a retangular e são fibrosas, fazendo com que elas se aglomerem. Portanto, quando a fração de eucalipto em volume se torna maior que 40%, são formados canais ao longo do leito impedindo a sua fluidização, conforme pode ser observado na Figura 51. É possível ainda observar que o eucalipto apresenta elevada segregação dificultando ainda mais a fluidização.



Figura 51 – Canais preferenciais criados no leito

Por outro lado, as misturas com casca de pinus, onde a casca de pinus apresenta uma massa específica aparente ( $0,286 \text{ g/cm}^3$ ) bastante diferente da areia 01 ( $1,616 \text{ g/cm}^3$ ) e da areia 02 ( $1,598 \text{ g/cm}^3$ ), tiveram um comportamento melhor durante a fluidização. Esta diferença provavelmente se dá devido à morfologia das partículas, que possuem um formato mais próximo ao esférico em relação às partículas de eucalipto. Segundo Rowe e Nienow (1976), a diferença de massa específica entre as partículas tem mais influência na fluidização do que o tamanho de partículas.

Apesar de ocorrer a segregação do material mesmo a baixas frações de biomassa, conforme pode ser visto na Figura 52 e Figura 53, a fluidização é melhor nas misturas de pinus e areia.



Figura 52 – Mistura A02.20P



Figura 53 – Mistura A02.60P

Esta segregação está associada à granulometria da amostra de pinus utilizada, que possui proporções significativas de diversos tamanhos. As partículas menores e mais leves segregam e se mantêm na superfície do leito.

#### 4.2.4 Influência da fração de biomassa nas misturas

Na Figura 54 e Figura 55 são apresentadas as evoluções das velocidades de mínima fluidização em função da fração em massa de biomassa para cada mistura.

Foi observado que, no caso das misturas de eucalipto não houve uma variação significativa da velocidade de mínima fluidização do inerte puro em relação às misturas A01.20E e A02.20E, que correspondem às frações de massa de biomassa de 1,43% e 1,45%, respectivamente. Com o aumento das massas de eucalipto pode-se observar uma evolução das velocidades de mínima fluidização. Em função das características da biomassa de eucalipto, é necessária uma velocidade cada vez mais alta de gás por causa dos caminhos preferenciais formados no leito.

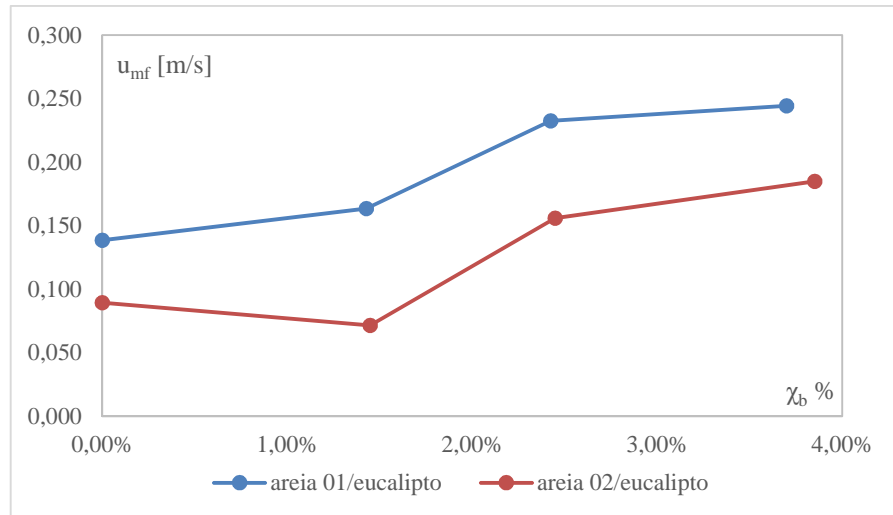


Figura 54 – Velocidade de mínima fluidização em função da fração de eucalipto

Na Figura 55 é possível observar um comportamento bastante diferenciado entre as misturas de pinus e areia. Este efeito está atribuído à diferença de tamanho médio entre as partículas de pinus e areia. A areia 01 possui um tamanho médio maior que a areia 02 e portanto a segregação entre o inerte e biomassa se torna mais fácil, mesmo em baixas concentrações de biomassa. A areia 02, por possuir um tamanho menor que a areia 01, preenche melhor os espaços entre as partículas de biomassa, gerando maior perda de carga no leito. A partir das misturas de 30% de volume de biomassa, a segregação ocorre com mais facilidade, fazendo com que a velocidade mínima de fluidização seja maior a cada incremento de biomassa na mistura.

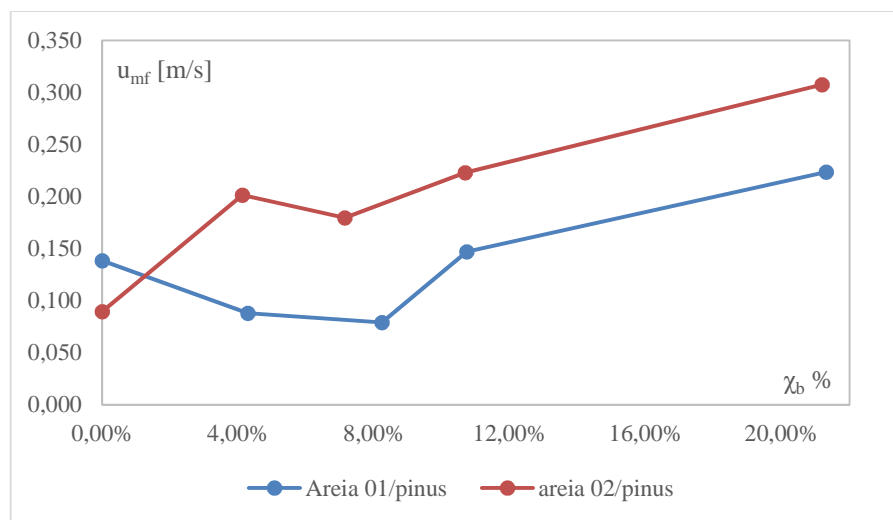


Figura 55 – Velocidade de mínima fluidização em função da fração de pinus

Os resultados das velocidades características para cada mistura de inerte/biomassa são apresentadas na Tabela 17 e Tabela 18.

Na Figura 56 e Figura 57, são apresentadas as evoluções das velocidades características das misturas de areia01/eucalipto e areia02/eucalipto. Observa-se uma estabilidade na velocidade de mínima fluidização que permanece próxima à do inerte. As velocidades aparente e de mínima fluidização apresentam um aumento com o aumento da massa de biomassa, porém a velocidade de fluidização completa apresenta uma queda com aumento da massa de biomassa nas misturas de areia 02 com eucalipto (Figura 57) em função da segregação do eucalipto que é mais intensa quando a biomassa é misturada com a areia 02.

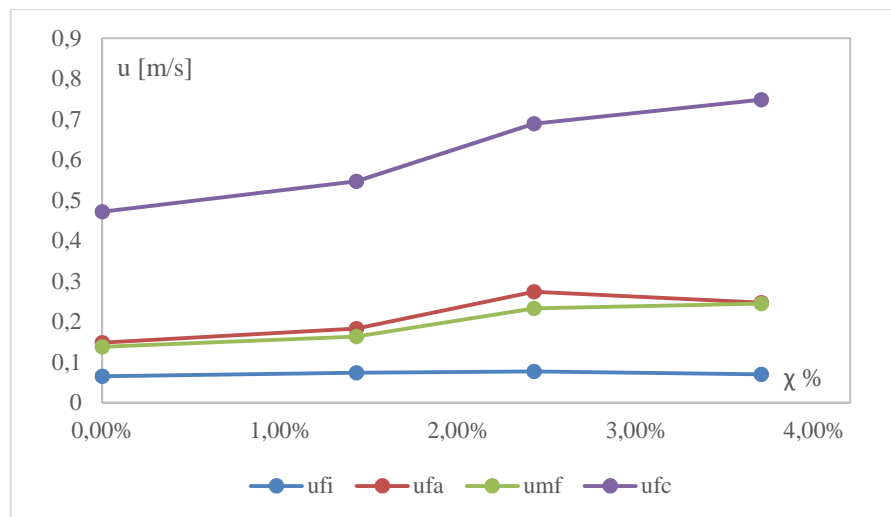


Figura 56 – Evolução das velocidades características das misturas de areia01/eucalipto

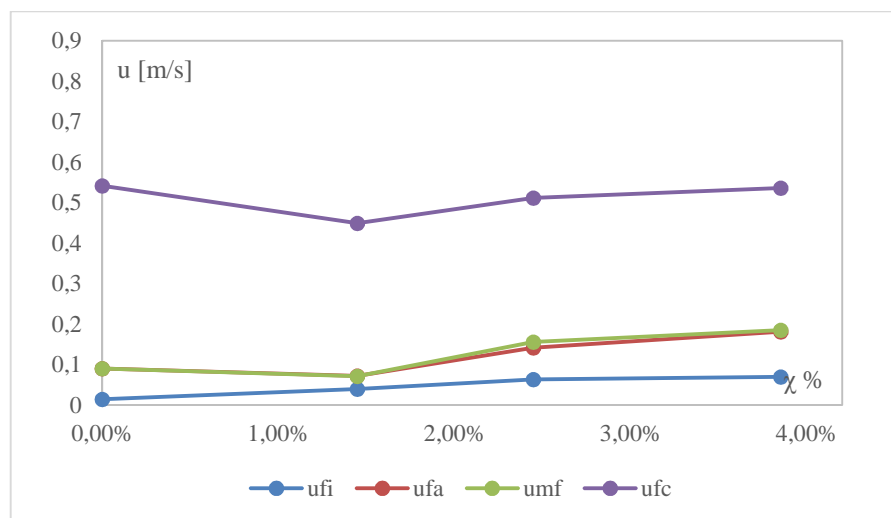


Figura 57 – Evolução das velocidades características das misturas de areia02/eucalipto

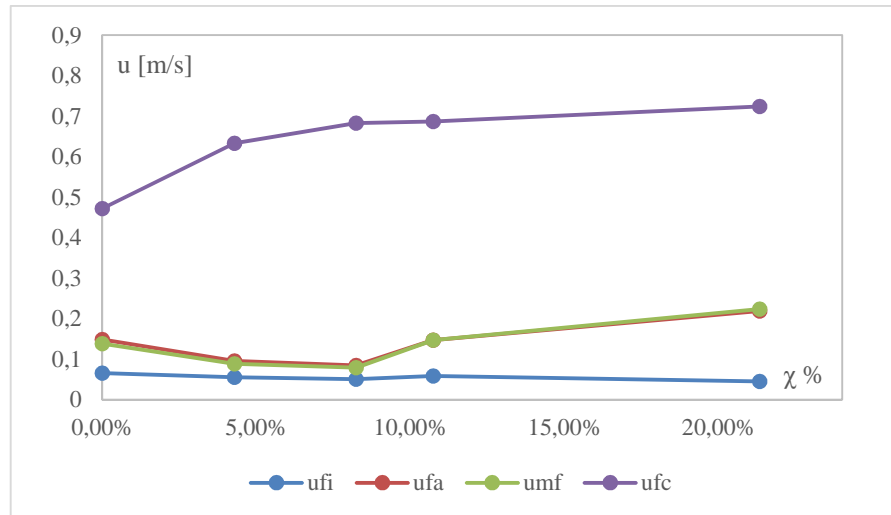


Figura 58 – Evolução das velocidades características das misturas de areia01/pinus

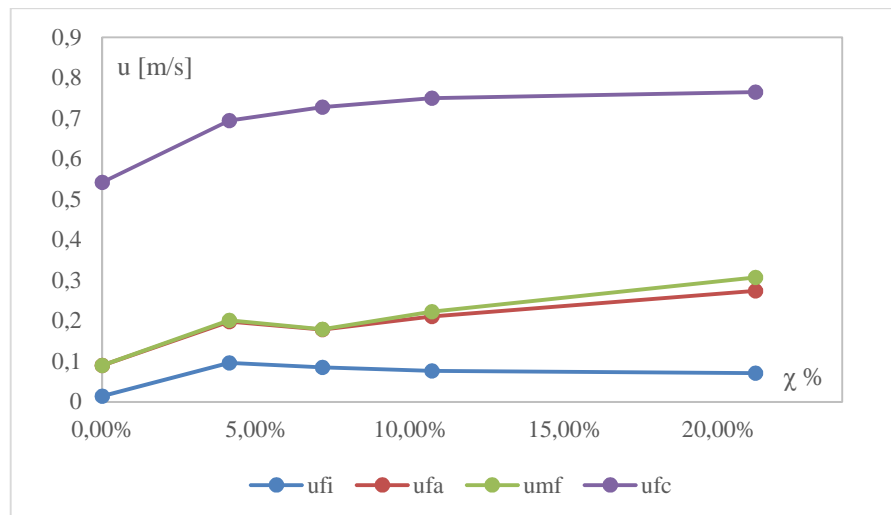


Figura 59 – Evolução das velocidades características das misturas de areia02/pinus

Na Figura 58 a mistura de areia 01 com pinus apresenta uma velocidade de fluidização inicial quase constante, próxima da velocidade inicial do inerte, mesmo com o aumento da proporção de biomassa na mistura, comprovando o efeito do tamanho médio das partículas de areia 01 que não preenchem os espaços entre as partículas de biomassa como a areia 02.

Na Figura 59 pode ser observado que a velocidade de fluidização inicial ( $u_{fi}$ ) da mistura de areia 02 com o pinus apresenta um aumento com a adição de 20% do volume de biomassa, comprovando o aumento da perda de pressão no leito.



#### 4.2.5 Evolução da porosidade aparente e completa das misturas

Na Figura 60, Figura 61, Figura 64 e Figura 65 são apresentadas as evoluções das porosidades de fluidização aparente ( $\varepsilon_{fa}$ ) e completa ( $\varepsilon_{fc}$ ) para cada mistura. A porosidade de fluidização aparente está atribuída à porosidade no leito no instante em que a velocidade de fluidização aparente é alcançada, ao passo que a porosidade de fluidização completa é a porosidade do leito no instante em que a velocidade de fluidização completa é atingida.

Na Figura 60 e Figura 61 são apresentadas as porosidades para as misturas de areia/eucalipto. Observa-se que, com o aumento da concentração desta biomassa na mistura, a porosidade do leito tende a aumentar. Esta variação deve-se às características da biomassa, que formam aglomerações e, conseqüentemente, bolsas de ar no interior do leito, conforme pode ser observado na Figura 62 e Figura 63.

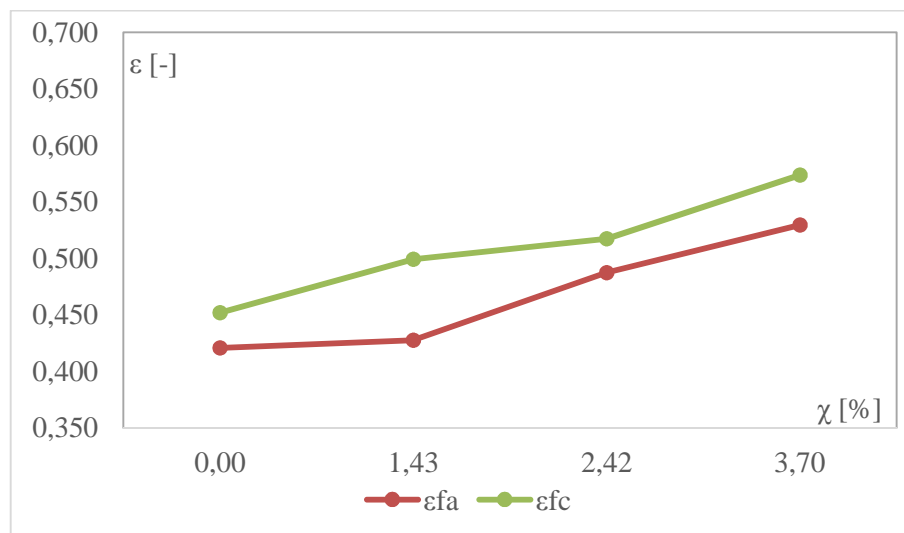


Figura 60 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia01/eucalipto

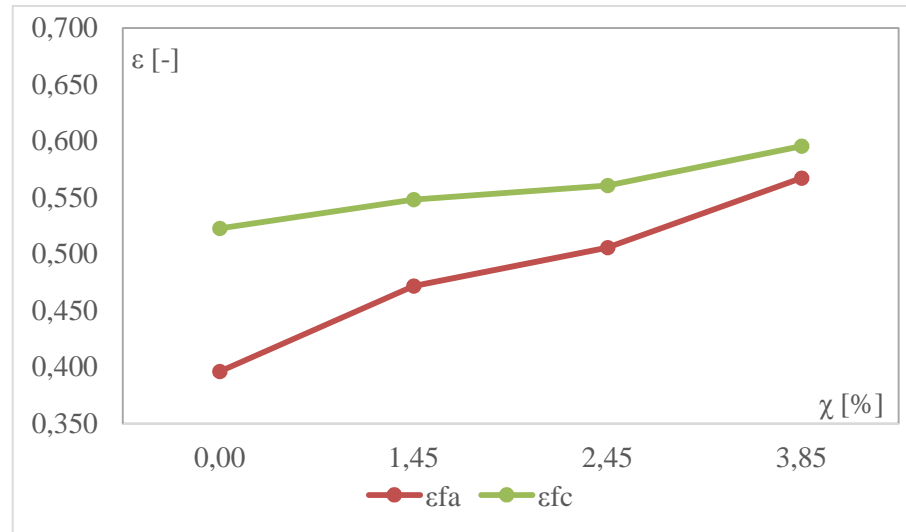


Figura 61 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia02/eucalipto



Figura 62 – Bolsas de ar em meio ao leito



Figura 63 – Bolsas de ar em meio ao leito

Na Figura 64 observa-se uma redução da porosidade de fluidização aparente com uma concentração de 20% do volume de biomassa (4,3% de massa de pinus) em relação à porosidade de fluidização aparente com areia01 pura e na Figura 65 observa-se o contrário, um aumento da porosidade de fluidização aparente para a mistura com 20% do volume de biomassa (4,12% de massa de pinus) em relação à porosidade de fluidização aparente da areia 02. Estas diferenças justificam a variação das velocidades de mínima fluidização observadas na Figura 55. Devido à diferença do tamanho médio das areia01 e areia02, a mistura com a casca de pinus gera efeitos diferentes. A mistura de areia01/pinus apresenta maior segregação e formação de canais preferenciais, reduzindo assim a porosidade do leito, já a mistura areia02/pinus, em função da

melhor homogeneidade de mistura, gera uma perda de carga superior, aumentando assim a porosidade do leito.

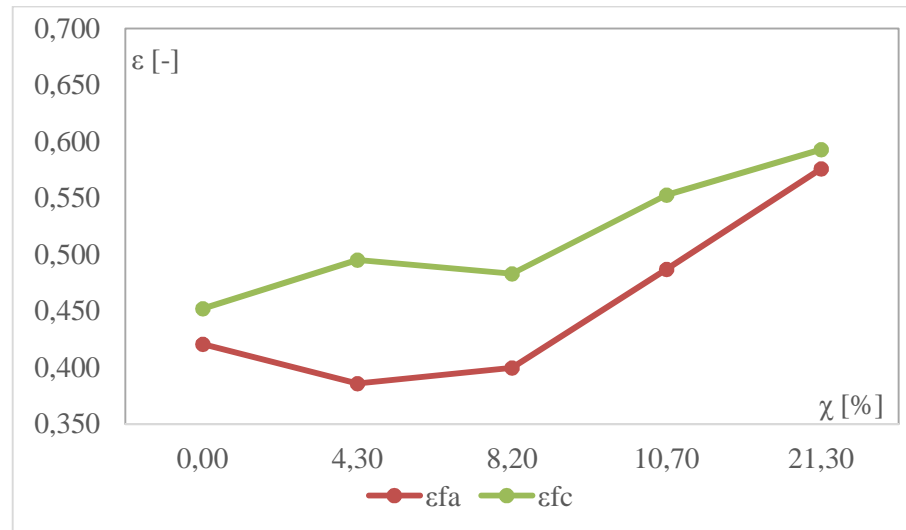


Figura 64 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia01/pinus

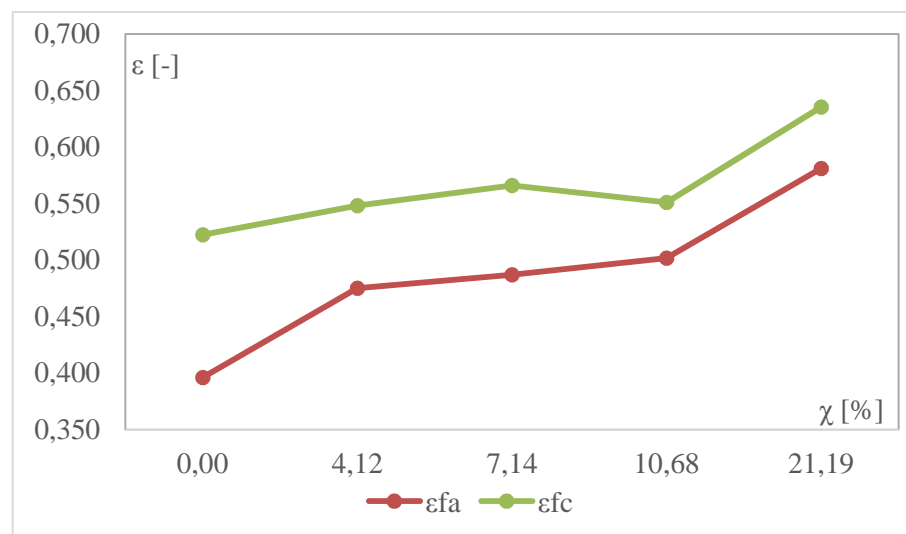


Figura 65 – Evolução da porosidade do leito para misturas de areia02/pinus

### 4.3 Comparativo dos resultados com a literatura

Na Tabela 19, estão apresentados os erros relativos médios absolutos (ERMA) obtidos para as velocidades de mínima fluidização deste trabalho ( $u_{mf,e}$ ) – valores experimentais – em relação às velocidades de mínima fluidização calculadas ( $u_{mf,t}$ ) através da equação (23), proposta por Paudel e Feng (2013) – valores teóricos. Na Figura 66, Figura 67, Figura 68 e

Figura 69, são apresentados os erros relativos de forma gráfica, onde é possível observar a variação para cada mistura.

Tabela 19 – Comparativo entre  $Re_{mf}$  teórico e experimental

<b>Tipo de mistura</b>	<b>ERMA</b>
Areia 01 com eucalipto	12,70 %
Areia 02 com eucalipto	31,90 %
Areia 01 com pinus	140,33 %
Areia 02 com pinus	19,10 %

Estes erros podem ser atribuídos às características das biomassas utilizadas neste trabalho e pelos autores, que apresentam diferenças principalmente em relação à massa específica aparente. Enquanto a porosidade média das biomassas utilizadas por Paudel e Feng (2013) possuem um valor de 0,623, as biomassas de pinus e eucalipto apresentaram uma porosidade média de 0,85, conforme pode ser observado na Tabela 20.

Tabela 20 – Diferenças entre as propriedades das biomassas deste trabalho em relação ao trabalho de Paudel e Feng (2013)

<b>Propriedade</b>	<b>Presente trabalho</b>		<b>Paudel e Feng (2013)</b>	
	<b>Eucalipto</b>	<b>Pinus</b>	<b>Casca de noz</b>	<b>Espiga de milho</b>
$d$ [ $\mu m$ ]	537	579	856	1040
$\rho_p$ [ $g/cm^3$ ]	1,39	1,27	1,2	1,08
$\rho_{ap}$ [ $g/cm^3$ ]	0,09	0,29	0,63	0,52

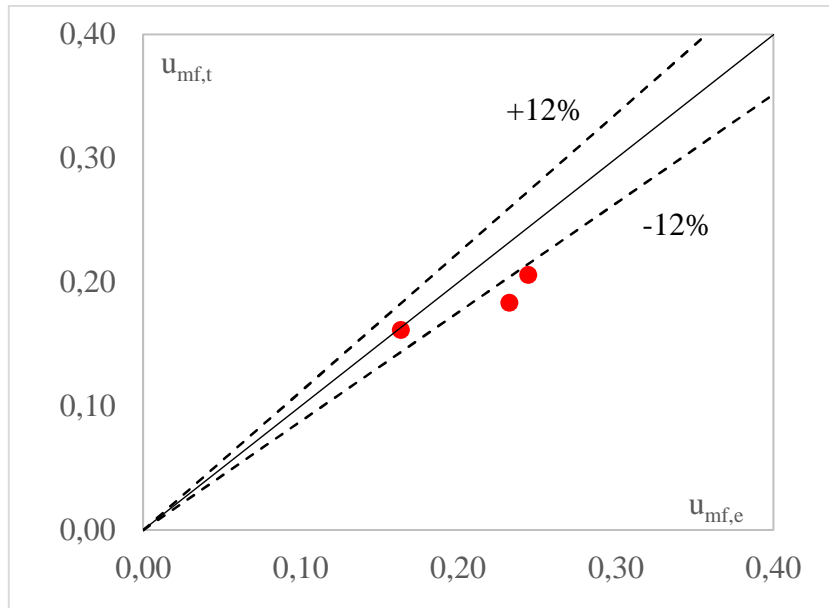


Figura 66 – Comparação entre  $u_{mf}$  teórica e experimental (areia01/eucalipto)

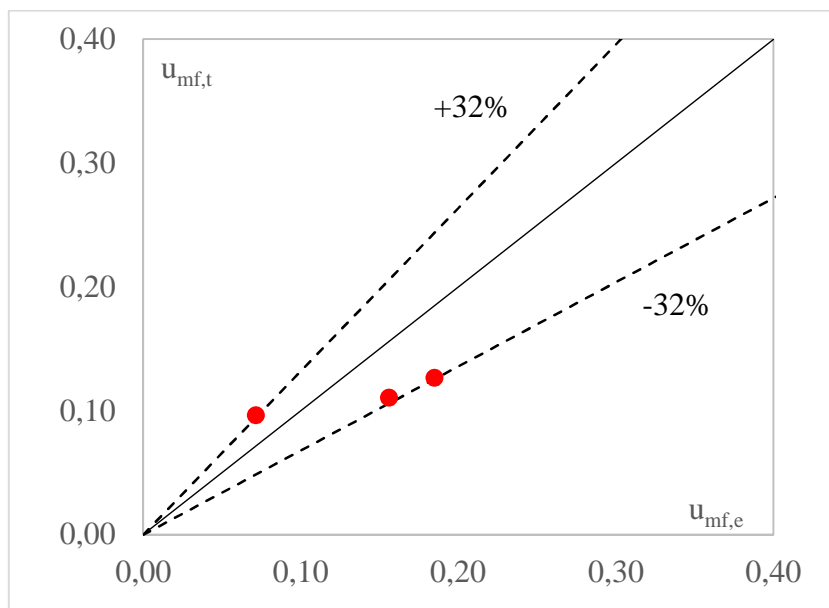


Figura 67 – Comparação entre  $u_{mf}$  teórica e experimental (areia02/eucalipto)

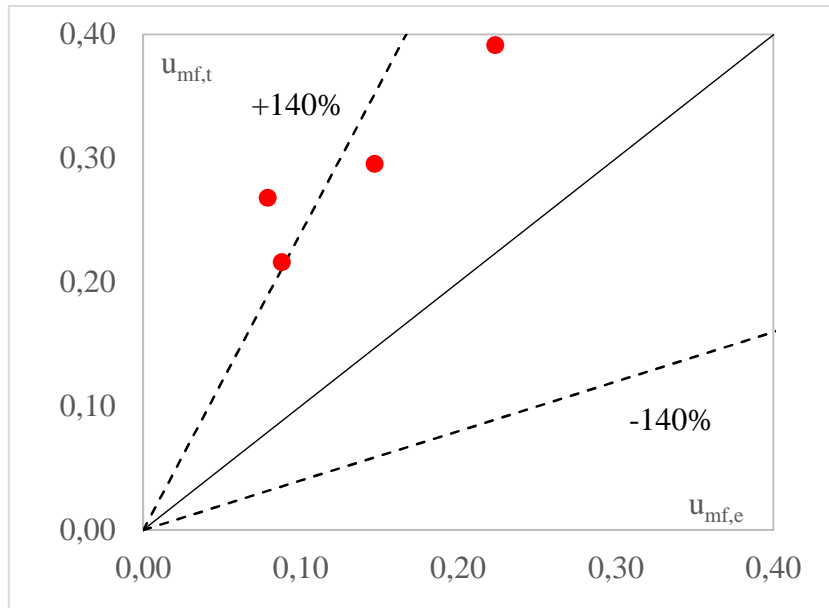


Figura 68 – Comparação entre  $u_{mf}$  teórica e experimental (areia01/pinus)

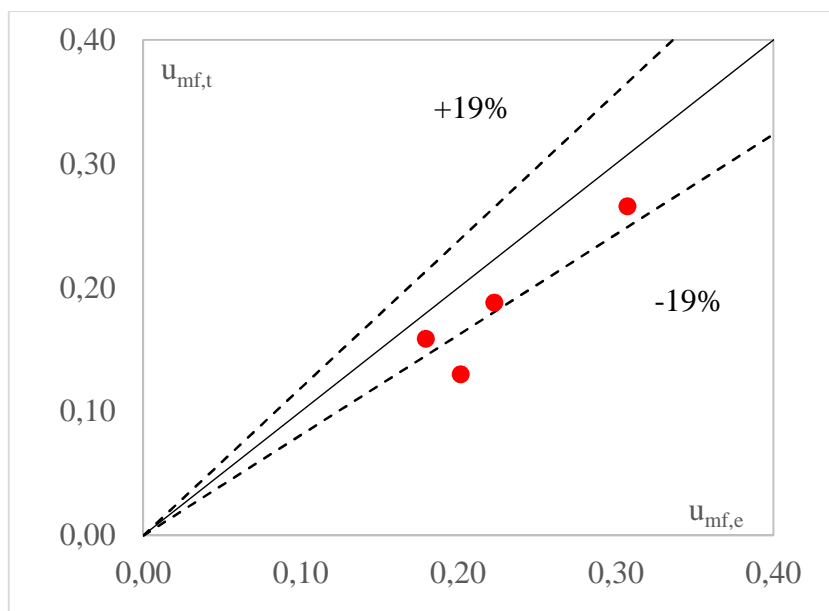


Figura 69 – Comparação entre  $u_{mf}$  teórica e experimental (areia02/pinus)

## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho são apresentadas as conclusões referentes à caracterização dos materiais e às propriedades fluidodinâmicas das misturas de inerte e biomassa.

### 5.1 Em relação à caracterização dos materiais

Verificou-se que a casca de eucalipto apresenta elevada massa específica aparente em função de seu formato fibroso e esta propriedade faz com que o material separe-se facilmente do material inerte durante o processo de fluidização. Esta característica pode ser observada nas imagens de microscopia eletrônica de varredura. A morfologia das partículas de eucalipto impediu a utilização de uma metodologia científica para a realização da granulometria, optando-se por uma metodologia alternativa para determinar o tamanho médio das partículas.

A casca de pinus apresenta uma massa específica real menor que a do eucalipto, sugerindo uma porosidade superior em relação às partículas de eucalipto. A massa específica aparente se apresentou maior, devido à morfologia das partículas. Estas características foram verificadas no microscópio eletrônico de varredura.

A areia 01 e areia 02 apresentam massa específica real bastante próximas entre si, porém com pequena diferença em relação ao tamanho médio. A areia 02, por ter um tamanho médio menor, apresentou maior facilidade na homogeneização com as biomassas.

### 5.2 Em relação à fluidodinâmica das misturas

Devido às características do eucalipto e do pinus, não foi possível a obtenção das curvas de fluidização destas biomassas individualmente.

As características do eucalipto influenciaram de forma negativa na fluidização das misturas. Em função da segregação dos materiais, formam-se canais preferenciais que comprometem a fluidização.

As misturas de areia e pinus apresentaram uma qualidade superior em relação ao eucalipto, em função do formato das partículas e da massa específica aparente, porém para misturas com uma concentração acima de 21,19% de massa desta biomassa não foi possível realizar a fluidização, devido à segregação dos materiais.

### **5.3 Em relação à comparação com a literatura**

Foi verificado que a correlação para misturas de inerte e biomassa proposta por Paudel e Feng (2013) apresenta uma boa aproximação para a determinação da velocidade de mínima fluidização, com exceção das misturas de areia01/pinus, que apresentaram erros relativos na ordem de 140%. Esta variação se deve às características de massa específica aparente e tamanho das partículas de biomassa e inerte.

Não foi possível propor novas constantes  $K_1$  e  $K_2$  para uma nova correlação, pois foram utilizados apenas dois tipos de biomassa que não fluidizam sem serem misturadas com um inerte.

### **5.4 Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se como trabalhos futuros a análise da viabilidade de se trabalhar com a combustão e gaseificação das biomassas utilizadas neste trabalho e a utilização de diferentes inertes como calcáreo, nas misturas.

Elaborar uma análise financeira com base nas quantidades de biomassa nas misturas com o objetivo de avaliar a viabilidade de combustão deste material em leito fluidizado.



## 6 REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, Z. M.; HUSAIN, Z.; YIN PONG, L. S. Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, p. 487-494, 2003.
- BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- CHEUNG, L.; NIENOW, A. W.; ROWE, P. N. Minimum fluidization velocity of a binary mixture of different sized particles. **Chemical Engineering Science**, v. 29, p. 1301-1303, 1974.
- CHIBA, S. et al. The minimum fluidization velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixtures. **Powder Technology**, v. 22, p. 255-269, 1979.
- CHIBA, S. et al. FLuidised binary mixtures in which the denser component may be flotsam. **Powder Technology**, v. 26, p. 1-10, 1980.
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012. ISBN 978-85-212-0593-7.
- CUI, H.; GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase. **Chemical Engineering Science**, v. 62, p. 45-55, 2007.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical engineering progress**, v. 48, p. 89-94, 1952.
- FORMISANI, B. Packing and fluidization properties of binary mixtures of spherical particles. **Powder Technology**, v. 66, p. 259-264, 1991.
- FORMISANI, B.; 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 pattern of density-segregating binary mixtures. **Chemical engineering research and design**, v. 86, p. 344-348, 2008.
- FORMISANI, B.; GIRIMONTE, R.; VIVACQUA, V. The interaction between mixture components in the mechanism of binary fluidization. **Powder Technology**, v. 266, p. 228-235, 2014.
- FOTOVAT, F.; CHAOUKI, J.; BERGTHORSON, J. The effect of biomass particles on the gas distribution and dilute phase characteristics of sand–biomass mixtures fluidized in the bubbling regime. **Chemical Engineering Science**, v. 102, p. 129-138, 2013.
- GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.
- GIDASPOW, D. **Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions**. San Diego: Academic Press, Inc., 1994. ISBN 0-12-282470-9.
- GOOSSENS, W. R. A.; DUMONT, G. L.; SPAEPEN, G. L. Fluidization of Binary Mixtures in the Laminar Flow Region. **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, v. 67, p. 38-45, 1971.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1991.

LIPPENS, B. C.; MULDER, J. Prediction of the minimum fluidization velocity. **Powder Technology**, v. 75, n. 1, p. 67-78, 1993.

LOURENÇO, J. B. **Estudo das características fluidodinâmicas de misturas da madeira de eucalipto e do caroço do fruto do tucumã com inerte visando aplicação em processos de termoconversão**. Campinas. 2012.

LUCAS, A. et al. High temperature incipient fluidization in mono and polydisperse systems. **Chemical Engineering Communication**, v. 41, p. 121-132, 1986.

MASSARANI, G.; PEÇANHA, R. P. Dimensão Característica e Forma de Partículas. **CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS**, Campinas, v. 14, p. 313-312, 1986.

MOURAD, M.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. Hydrodynamique d'un séchoir à lit fluidisé à flottation: Détermination des vitesses caractéristiques de fluidisation de mélanges de maïs et de sable. **Powder Technology**, v. 14, p. 45-54, 1994.

NODA, K. Minimum fluidization velocity of binary mixture of particles with large size ratio. **Powder Technology**, v. 46, p. 149-154, 1986.

OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. ISBN 0-8247-4699-6.

OTERO, A. R.; CORELLA, J. Fluidizacion de mezclas de solidos de distintas características. **An R Soc Esp Fis y Quim**, v. 67, p. 1207, 1971.

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.

PÉCORA, A. A. B. et al. Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical-chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p. 188-197, 2014.

QUINTERO, D. A. R.; PÉCORA, A. A. B. **Fluidizing Velocities of Bamboo/Sand Mixtures**. Turku, 2015.

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

RASUL, G. M.; RUDOLPH, V. Fluidized bed combustion of Australian bagasse. **Fuel**, v. 79, p. 123-130, 2000.

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.

ROWE, P. N.; NIENOW, A. W. Particle Mixing and Segregation in Gas Fluidised Beds. A Review. **Powder Technology**, v. 15, p. 141-147, 1976.

TANNOUS, K.; LOURENÇO, J. B. Fluid Dynamic and Mixing Characteristics of Biomass Particles in Fluidized Beds. In: TANNOUS, K. **Innovative Solutions in Fluid-Particle Systems and Renewable Energy Management**. IGI Global, 2015. cap. 3, p. 54-91.

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. 38, p. 233-239, 1984.

WADELL, H. Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles. **The Journal of Geology**, v. 40, 1932.

WADELL, H. Volume, shape and roundness of quartz particles. **Journal of Geology**, v. 43, p. 250-280, 1935.

WEN, C. Y.; YU, Y. H. Mechanics of Fluidization. **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, v. 62, p.100-111, 1966.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Insight 2013**. Daegu. 2013.

YANG, W.-C. **Handbook of Fluidization and fluid-particle system**. New York: Marcel Dekker, 861 p., 2003.

## APÊNDICE A

### Perda ao fogo

A análise de perda ao fogo determina a quantidade de material orgânico da amostra e foi realizada seguindo a norma ASTM D2617 – 12.

Uma amostra de biomassa é colocada em um cadinho previamente pesado e o conjunto é pesado novamente. Após esta pesagem o cadinho com a amostra é colocado dentro de uma mufla onde é aquecido a uma temperatura de  $550 \pm 25$  °C. A amostra é então mantida a esta temperatura por quatro horas. Após este período inicia-se o resfriamento natural até pouco abaixo de 100 °C, conforme a Figura 70.



Figura 70 – Amostras em resfriamento na análise de perda ao fogo

Ao atingir temperatura abaixo de 100 °C a amostra é então acondicionada em um dessecador até o seu resfriamento a temperatura ambiente. O dessecador tem a função de evitar a adsorção de umidade pela amostra. Realizado o resfriamento o cadinho com a amostra é então pesado novamente. O resíduo após este processo são as cinzas.

Comparando a massa da amostra inicial com a final foi calculada a proporção de matéria orgânica da amostra, conforme a Tabela 21. O procedimento foi realizado em triplicata.

Tabela 21 – Perda ao fogo das biomassas

Amostra	PF [%]
Casca de eucalipto	95,51±0,05
Casca de pinus	97,46±0,07

### Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível é definido como a energia liberada na forma de calor durante sua combustão completa. Podem ser determinados o poder calorífico superior (PCS) e o inferior (PCI) de um combustível. O valor de PCS é encontrado quando a água ao final da combustão se encontra no estado líquido.

A determinação do poder calorífico superior foi realizada utilizando um calorímetro de combustão da marca Ika, modelo C 200, conforme Figura 71. O equipamento possui uma precisão de  $\pm 0,1\%$ .



Figura 71 – Calorímetro Ika C 200

A análise é realizada com uma amostra de 1 g de material que é colocado em um cadinho metálico. Este cadinho por sua vez é inserido dentro de um vaso de aço inox chamado de bomba, que é preenchido com oxigênio e pressurizado a uma pressão de 30 bar. A bomba é então colocada dentro de um compartimento do equipamento envolto em água como isolante.

A amostra entra em combustão através de um dispositivo de ignição com fio de algodão, que possui uma energia de combustão conhecida. O calor gerado na combustão é então determinado pelo equipamento.

Os valores de poder calorífico superior (PCS) encontrados para as amostras de biomassa estão na Tabela 22. O procedimento foi realizado em triplicata.

Tabela 22 – Poder calorífico superior das biomassas

<b>Amostra</b>	<b>PCS [MJ/kg]</b>
Casca de eucalipto	15,839±0,315
Casca de pinus	19,181±0,356