

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

ENZO SCHLOTTFELDT OCANHA

**ESTUDO DE FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS VISANDO A
PROPOSIÇÃO DE UM MODELO EMPÍRICO FÍSICO**

**SÃO LEOPOLDO
2018**

Enzo Schlottfeldt Ocanha

ESTUDO DE FLUIDIZAÇÃO DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS VISANDO A
PROPOSIÇÃO DE UM MODELO EMPÍRICO FÍSICO

Dissertação apresentada como pré-requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da
UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Flávia S. F. Zinani
Coorientador: Prof. Dr. Fernando A. Santos

Banca Examinadora:

Dra. Katia Tannous (UNICAMP / FEQ)

Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes (UNISINOS / PPGEM)

Dr. Paulo Roberto Wander (UNISINOS / PPGEM)

SÃO LEOPOLDO
2018

O15e

Ocanha, Enzo Schlottfeldt.

Estudo de fluidização de biomassas lignocelulósicas visando a proposição de um modelo empírico físico / Enzo Schlottfeldt Ocanha. – 2018.

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

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, 2018.

“Orientadora: Profa. Dra. Flávia S. F. Zinani ;
Coorientador: Prof. Dr. Fernando A. Santos.”

1. Biomassa. 2. Fluidização. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

CDU 620.9

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Bruna Sant’Anna – CRB 10/2360)

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha namorada, à minha irmã e a todos aqueles que tinham certeza que eu venceria, antes mesmo que eu começasse a lutar.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio em todos os momentos.

À professora Flávia Schwarz Franceschini Zinani, pela orientação e confiança ao longo deste trabalho.

À banca examinadora, formada pelos professores Carlos Alberto Mendes Moraes, Paulo Roberto Wander e Katia Tannous, pelas críticas e sugestões.

Aos amigos e colegas do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS, em especial Lucas Ezequias e Maurício Leitão, pelo convívio e companheirismo.

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido.

A todos que, embora não tenham sido mencionados, contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A tecnologia de leito fluidizado é uma das alternativas de maior eficiência e viabilidade para conversões de energia térmica em um cenário de baixo carbono, permitindo o uso de combustíveis com partículas irregulares e alto teor de umidade, como biomassas. Estudos de dinâmica de fluidos de leitos fluidizados fornecem informações valiosas para a concepção e operação destes sistemas. No entanto, a modelagem matemática da fluidização, mesmo para partículas homogêneas, é um assunto complexo: compreende modelar o escoamento do gás, o escoamento dos sólidos e a interação entre eles. No caso de misturas de partículas com diferentes propriedades físicas, prever a dinâmica da fluidização é um grande desafio. É recorrente a utilização de correlações empíricas para determinar parâmetros de projeto, tais como velocidades características de fluidização. O objetivo do presente trabalho foi comparar as velocidades características de fluidização obtidas experimentalmente com predições de correlações da literatura, e verificar quais parâmetros físicos e fisico-químicos são mais apropriados para a predição destas velocidades, através de regressão linear múltipla. As biomassas avaliadas foram palha e bagaço de cana-de-açúcar, madeira de eucalipto, casca de arroz e ramos de macieira, em misturas com areia com proporções de 20, 40, 60 e 80 por cento de biomassa em volume. Os materiais foram caracterizados quanto ao seu tamanho médio de partícula (métodos de Sauter e Feret), massa específica real, aparente e aparente compactada, composição química, elementar e imediata, poder calorífico, ângulo de repouso estático, esfericidade e razão de aspecto. Um modelo de reator em escala de bancada, com 94 mm de diâmetro interno, foi empregado para fluidizar as misturas de biomassas e areia. As variáveis medidas foram a vazão volumétrica de ar e a queda de pressão ao longo do leito. A regressão linear múltipla foi realizada no software SPSS 22. A caracterização dos materiais mostrou que as biomassas apresentam composição elementar semelhante, e pequenas diferenças nas composições química e imediata. As massas específicas reais variaram entre 1002 kg/m³ para a palha de cana e 2587 kg/m³ para a areia, e as massas específicas aparentes soltas variaram entre 98 kg/m³ para a palha de cana e 1499 kg/m³ para a areia. O diâmetro médio de Sauter das partículas variou entre 363 µm para a areia e 931 µm para a palha de cana, enquanto que o de Feret variou entre 378 µm para a areia e 2718 µm para a palha de cana. Os testes de fluidização mostraram velocidades mínimas de fluidização U_{mf} entre 0,11 e 0,38 m/s, e velocidades de fluidização completa U_{cf} entre 0,18 e 0,82 m/s para as misturas. As misturas de biomassa e areia fluidizaram bem em proporções de até 60% em volume de biomassa. Para proporções acima deste limite, verificou-se intensa formação de caminhos preferenciais e a ocorrência de aglomerações no leito. As correlações testadas não foram capazes de prever a U_{mf} e a U_{cf} em qualquer situação, apresentando grande dispersão nos resultados e erros relativos de mais de 60%. A regressão linear múltipla indicou como parâmetros mais relevantes para a predição das velocidades características de fluidização a massa específica aparente solta e o ângulo de repouso. As correlações propostas em função dessas propriedades obtiveram bons resultados na predição dessas velocidades: o coeficiente R^2 ajustado obtido na predição de U_{mf} foi de 0,782, enquanto na predição de U_{cf} foi de 0,855. Para a U_{mf} , em 90% das misturas o erro relativo encontrado foi inferior a 24,3%, enquanto para a U_{cf} em 90% dos casos este erro foi inferior a 22,5%. A proposta do ângulo de repouso como preditor das velocidades características de fluidização é inédita, bem como o reconhecimento da massa específica aparente como parâmetro mais relevante na predição dessas velocidades.

Palavras-chave: Leito fluidizado. Biomassas. Fontes de energia renováveis. Modelo empírico. Regressão linear múltipla.

ABSTRACT

Thermal energy conversion industries have been increasingly employing fluidized bed combustion technology, as it currently is one of the most efficient and feasible alternatives for a low carbon scenario. Fluid dynamics researches of fluidized beds provide valuable information for the design and operation of these systems. However, fluidization mathematical modeling, even for homogeneous particles, is a complex subject: it involves modeling gas flow, solids flow and the interaction between them. In the case of mixtures of particles with different physical properties, predict fluidization behavior is a great challenge. Usually empirical correlations are used to determine design parameters, such as characteristic fluidization velocities. The objectives of the present work were to compare characteristic fluidization velocities obtained experimentally with predictions of correlations from literature, and to verify if other physical and physicochemical parameters could be more appropriate for prediction of these velocities. Biomasses evaluated were sugarcane straw and bagasse, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches, in mixtures with sand in the following proportions: 20, 40, 60 and 80 percent of biomass volume fraction. Materials were characterized by their mean particle size (Sauter and Feret methods), true density, loose and tapped bulk densities, chemical, proximate and elemental compositions, higher heating value, repose angle, sphericity and aspect ratio. A bench scale reactor, with 94 mm internal diameter, was used to fluidize biomass and sand mixtures. Measured variables were air flow rate and pressure drop along the bed. Multiple linear regression was performed on SPSS 22 software. Materials characterization showed that biomasses present similar elemental composition, but differences in chemical and proximate compositions. True mass densities varied between 1002 kg/m³ for straw and 2587 kg/m³ for sand, and loose bulk densities varied between 98 kg/m³ for straw and 1499 kg/m³ for sand. Mean Sauter diameter of particles ranged from 363 μm for sand to 931 μm for straw, while Feret mean diameter ranged from 378 μm for sand to 2718 μm for straw. Fluidization tests showed minimum fluidization velocities U_{mf} between 0.11 and 0.38 m/s, and complete fluidization velocities U_{cf} between 0.18 and 0.82 m/s for mixtures. Biomass and sand mixtures fluidized well in proportions up to 60% in volume of biomass. For proportions above this limit, there was intense formation of preferential channels and the occurrence of agglomerations in bed. Tested correlations were unable to predict U_{mf} and U_{cf} in any situation, presenting great dispersion of results and relative errors higher than 60%. Multiple linear regression indicated mixtures bulk densities and repose angles as the most relevant parameters in the prediction of characteristic fluidization velocities. The two developed correlations from these properties obtained good results in prediction of these velocities: the adjusted R² coefficient obtained at U_{mf} prediction was 0.782, while at U_{cf} prediction it was 0.855. For U_{mf} , on 90% of mixtures the relative error found was smaller than 24.3%, while for the U_{cf} on 90% of cases this error was smaller than 22.5%. Proposition of repose angle as a predictor for characteristic fluidization velocities are unprecedented, as well as the acknowledgment of bulk density as the most relevant parameter in the prediction of these velocities.

Key-words: Fluidization. Biomass mixtures. Renewable energy sources. Empirical correlation. Multiple linear regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de transição de regimes de fluidização	24
Figura 2.2 - Diagrama de Geldart para classificação de partículas sólidas na fluidização.....	25
Figura 2.3 - Curvas de fluidização típicas para partículas homogêneas e misturas	28
Figura 2.4 - Comportamento das partículas na fluidização de misturas com e sem segregação	29
Figura 2.5 - Relação entre Re_{mf} e o número de Arquimedes para partículas inertes	33
Figura 2.6 - Relação entre Re_{mf} e o número de Arquimedes para partículas de biomassa	35
Figura 2.7 - Relação entre Re_{mf} e o número de Arquimedes para misturas de biomassa	37
Figura 3.1 - Estrutura celular dos vegetais	41
Figura 3.2 - Distribuição da demanda primária mundial total de energia por fontes	43
Figura 3.3 - Evolução do suprimento total mundial de energia entre 1971 e 2014.....	43
Figura 3.4 - Distribuição da oferta mundial de energias renováveis por fonte	44
Figura 3.5 - Determinação do diâmetro médio de Feret.....	52
Figura 3.6 - Diâmetros inscrito e circunscrito de partículas irregulares.....	53
Figura 3.7 - Determinação do ângulo de repouso α	56
Figura 5.1 - Amostras preparadas de bagaço (a) e palha de cana (b)	62
Figura 5.2 - Imagem de partículas de ramos de macieira com aumento de 62x (a) e selecionadas no software ImageJ (b).....	64
Figura 5.3 - Funil e suporte utilizados no ensaio de ângulo de repouso.....	66
Figura 5.4 - Esquema da bancada de fluidização	70
Figura 5.5 - Curvas de queda de pressão do conjunto distribuidor e coluna.....	73
Figura 5.6 - Curvas de defluidização para a mistura 40CE	77
Figure 6.1 - Fluidization workbench scheme	83
Figure 6.2 - Fluidization and defluidization evolution for 20SS mixture	90
Figure 6.3 - Clusters and preferential channels formation in fluidization.....	90
Figure 6.4 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{mf} from an empirical correlation.....	94
Figure 6.5 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{cf} from an empirical correlation.....	94
Figure 6.6 - Re_{mf} and Ar_m relation for biomass and sand mixtures.....	95
Figure 7.1 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{mf} from developed correlation.....	105

Figure 7.2 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{cf} from developed correlation..... 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de K_1 e K_2 para Re_{mf} encontrados na literatura.....	33
Tabela 2.2 - Trabalhos de fluidização de partículas de biomassa	34
Tabela 2.3 - Trabalhos de fluidização de misturas de biomassa com inerte	37
Tabela 3.1 - Composição química típica de diferentes espécies vegetais	42
Tabela 3.2 - Composição elementar e poder calorífico superior de algumas biomassas	58
Tabela 5.1 - Padrão de abertura das peneiras	63
Tabela 5.2 - Composição imediata dos materiais	67
Tabela 5.3 - Composição elementar dos materiais	68
Tabela 5.4 - Composição química dos materiais	69
Tabela 5.5 - Composição das misturas de bagaço de cana e areia	74
Tabela 5.6 - Composição das misturas de palha de cana e areia	74
Tabela 5.7 - Composição das misturas de madeira de eucalipto e areia	74
Tabela 5.8 - Composição das misturas de casca de arroz e areia	75
Tabela 5.9 - Composição das misturas de ramos de macieira e areia	75
Table 6.1 - Results of physical characterization for sand and biomasses.....	87
Table 6.2 - Results of physicochemical characterization for sand and biomasses	89
Table 6.3 - Experimental characteristic fluidization velocities for sand and mixtures of sugarcane bagasse and straw, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches	92
Table 7.1 - Results of physical characterization for sand and biomasses.....	99
Table 7.2 - Results of physicochemical characterization for sand and biomasses	99
Table 7.3 - Experimental characteristic fluidization velocities for sand and mixtures of sugarcane bagasse and straw, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches	100
Table 7.4 - Multiple linear regression results for U_{mf}	102
Table 7.5 - Significance of multiple linear regression for U_{mf}	102
Table 7.6 - Coefficients and confidence interval of multiple linear regression for U_{mf}	102
Table 7.7 - Multiple linear regression results for U_{cf}	103
Table 7.8 - Significance of multiple linear regression for U_{cf}	103
Table 7.9 - Coefficients and confidence interval of multiple linear regression for U_{cf}	103
Table 7.10 - Summary of R^2 coefficients from U_{mf} and U_{cf} prediction by multiple linear regression.....	104
Table 7.11 - Relative errors from U_{mf} and U_{cf} prediction.....	106

LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balço Energético Nacional - Brasil
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia do RS
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
EIA	USA Energy Information Administration
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HHV	Higher Heating Value
IPR	Instituto de Petróleo e Recursos Naturais da PUCRS
LCVMAT	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
SBS	Sociedade Brasileira de Silvicultura
SO _x	Óxidos de Enxofre
UERGS	Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
UR	Umidade relativa

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área interna da seção transversal da coluna de fluidização [m ²]
AR	Razão de aspecto das partículas [-]
A_p	Área superficial da partícula [m ²]
Ar	Número de Arquimedes [-]
Ar_m	Número de Arquimedes efetivo da mistura [-]
b_i	Coefficiente de regressão linear “i”
b_i'	Coefficiente de regressão parcial padrão de Y em X _i
d	Diâmetro da pilha de biomassa [m]
d_{CC}	Diâmetro teórico circunscrito em uma partícula [m]
d_{CI}	Diâmetro teórico inscrito em uma partícula [m]
d_F	Diâmetro médio de Feret [m]
d_i	Diâmetro médio das partículas do componente “i” da mistura [m]
d_m	Diâmetro médio efetivo das partículas [m]
d_p	Diâmetro médio das partículas [m]
d_{pi}	Diâmetro de abertura da peneira “i” [m]
\bar{d}_{pi}	Diâmetro médio entre peneiras [m]
d_S	Diâmetro médio de Sauter [m]
h	Altura da pilha de biomassa [m]
H	Altura do leito [m]
H_m	Altura média do leito [m]
L_p	Comprimento da partícula [m]
m_p	Massa das partículas [kg]
Q	Vazão volumétrica medida de ar [Nm ³ /h]
Re	Número de Reynolds [-]
Re_{af}	Número de Reynolds na condição de fluidização aparente [-]
Re_{cf}	Número de Reynolds na condição de fluidização completa [-]
Re_{if}	Número de Reynolds na condição de fluidização inicial [-]
Re_{mf}	Número de Reynolds na condição de mínima de fluidização [-]
Re_s	Número de Reynolds na condição de segregação [-]
U	Velocidade média do ar de fluidização [m/s]
U_{af}	Velocidade aparente de fluidização [m/s]
U_{cf}	Velocidade de fluidização completa [m/s]
U_{if}	Velocidade inicial de fluidização [m/s]
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização [m/s]
U_s	Velocidade de segregação [m/s]
V_{ap}	Volume aparente das partículas [m ³]
V_p	Volume da partícula [m ³]
V_p	Volume real das partículas [m ³]
W_p	Largura da partícula [m]
x_b	Fração mássica de biomassa na mistura [-]
x_i	Fração mássica do componente “i” na mistura [-]
X_i	Variável independente “i” [-]
x_{pi}	Fração mássica de material retida na peneira “i” [-]
Y	Variável dependente [-]

Símbolos Gregos

μ_g	Viscosidade absoluta do fluido [Ns/m ²]
α	Ângulo de repouso [graus]
Δp	Queda de pressão corrigida no leito [mbar]
Δp_{medido}	Queda de pressão medida no leito [mbar]
ε	Porosidade do leito [-]
ε_{mf}	Porosidade do leito na condição de mínima fluidização [-]
ρ_{ap}	Massa específica aparente [kg/m ³]
ρ_{apc}	Massa específica aparente compactada [kg/m ³]
ρ_{apm}	Massa específica aparente da mistura [kg/m ³]
ρ_g	Massa específica real do fluido [kg/m ³]
ρ_i	Massa específica real do componente “i” na mistura [kg/m ³]
ρ_m	Massa específica efetiva da mistura [kg/m ³]
ρ_p	Massa específica real [kg/m ³]
ρ_s	Massa específica aparente das partículas sólidas [kg/m ³]
ϕ_s	Esfericidade das partículas [-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivos Específicos.....	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	19
2 FLUIDIZAÇÃO.....	21
2.1 FLUIDIZAÇÃO DE PARTÍCULAS HOMOGÊNEAS.....	21
2.1.1 Regimes de Fluidização.....	21
2.1.1.1 Leito Fixo.....	22
2.1.1.2 Leito Borbulhante.....	22
2.1.1.3 Leito Turbulento.....	22
2.1.1.4 Fluidização Rápida.....	23
2.1.1.5 Transporte Pneumático.....	23
2.1.2 Transição de Regimes de Fluidização.....	23
2.1.3 Classificação de Geldart para Partículas Sólidas.....	24
2.2 FLUIDIZAÇÃO DE MISTURAS.....	25
2.2.1 Velocidades Características de Fluidização.....	26
2.2.2 Mistura e Segregação de Partículas.....	28
2.2.3 Influência de Alguns Parâmetros nas Velocidades Características de Fluidização.....	29
2.3 CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA AS VELOCIDADES CARACTERÍSTICAS DE FLUIDIZAÇÃO.....	30
2.3.1 Velocidade Mínima de Fluidização.....	31
2.3.1.1 Velocidade Mínima de Fluidização para Partículas Inertes.....	31
2.3.1.2 Velocidade Mínima de Fluidização para Partículas de Biomassa.....	34
2.3.1.3 Velocidade Mínima de Fluidização para Misturas de Biomassa e Inerte.....	35
2.3.2 Velocidades de Fluidização Inicial, Aparente, de Segregação e Completa.....	38
3 BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS.....	40
3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	41
3.2 IMPORTÂNCIA ENERGÉTICA.....	42
3.3 CANA-DE-AÇÚCAR.....	45
3.3.1 Bagaço de Cana-de-açúcar.....	45
3.3.2 Palha de Cana-de-açúcar.....	46

3.4 MADEIRA DE EUCALIPTO.....	47
3.5 CASCA DE ARROZ.....	48
3.6 RAMOS DE MACIEIRA.....	49
3.7 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	50
3.7.1 Granulometria	50
3.7.1.1 Diâmetro Médio de Sauter.....	50
3.7.1.2 Diâmetro Médio de Feret.....	52
3.7.2 Razão de aspecto.....	53
3.7.3 Esfericidade.....	53
3.7.4 Massa Específica Real.....	54
3.7.5 Massa Específica Aparente.....	54
3.7.6 Massa Específica Aparente Compactada.....	55
3.7.7 Massa Específica do Envelope.....	55
3.7.8 Ângulo de Repouso Estático	56
3.8 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS.....	56
3.8.1 Composições Imediata, Elementar e Química.....	56
3.8.2 Poder Calorífico.....	57
4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	59
4.1 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA.....	59
4.1.1.1 Requisitos para Aplicação do Método.....	61
5 MATERIAIS E MÉTODOS	62
5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	62
5.1.1 Preparação das Biomassas	62
5.1.2 Preparação da Areia	63
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	63
5.2.1 Diâmetro Médio de Sauter	63
5.2.2 Diâmetro de Médio de Feret, Razão de Aspecto e Esfericidade	64
5.2.3 Massa Específica Real.....	64
5.2.4 Massa Específica Aparente Solta.....	65
5.2.5 Massa Específica Aparente Compactada.....	65
5.2.6 Ângulo de Repouso Estático	65
5.3 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS.....	66
5.3.1 Composição Imediata.....	66
5.3.2 Composição Elementar	68

5.3.3 Composição Química	69
5.3.4 Poder Calorífico.....	69
5.4 BANCADA DE FLUIDIZAÇÃO	70
5.4.1 Medição da Vazão Volumétrica de Ar	71
5.4.1.1 Determinação da Velocidade do Ar.....	71
5.4.2 Medição da Pressão Diferencial	72
5.4.3 Registro de Dados.....	72
5.4.4 Determinação da Queda de Pressão da Coluna e do Distribuidor	72
5.5 CURVAS DE FLUIDIZAÇÃO.....	73
5.5.1 Misturas de Biomassa e Inerte	73
5.5.2 Determinação das Curvas de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar	75
5.5.3 Determinação das Velocidades Características de Fluidização	76
5.6 OUTROS DADOS DE FLUIDIZAÇÃO	77
5.7 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	77
6 FLUIDIZATION STUDY OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASSES AND ITS PHYSICAL, CHEMICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS	79
6.1 INTRODUCTION.....	79
6.2 METHODOLOGY	81
6.2.1 Preparation and Characterization of Samples	81
6.2.2 Mixtures	82
6.2.3 Equipment Setup	83
6.2.4 Fluidization Procedures.....	84
6.2.5 Determination of Characteristic Fluidization Velocities	84
6.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	87
6.3.1 Physical Characterization of Materials.....	87
6.3.2 Physicochemical Characterization of Materials.....	88
6.3.3 Bed Pressure Drop as a Function of Superficial Gas Velocity	89
6.3.4 Experimental Characteristic Fluidization Velocities	91
6.3.5 Empirical Correlations: Results for Characteristic Fluidization Velocities.....	92
6.4 CONCLUDING REMARKS	96
7 EVALUATION OF THE MOST RELEVANT PARAMETERS IN THE FLUIDIZATION OF BIOMASS AND SAND BINARY MIXTURES THROUGH STATISTICAL ANALYSIS	97
7.1 INTRODUCTION.....	97

7.2 METHODOLOGY	98
7.2.1 Preparation and Characterization of Samples	98
7.2.2 Determination of Experimental Characteristic Fluidization Velocities.....	100
7.2.3 Multiple Linear Regression	101
7.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	101
7.3.1 Multiple Linear Regression	101
7.3.2 New Correlations.....	104
7.4 CONCLUDING REMARKS	107
8 CONCLUSÕES.....	108
REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

Analisando a taxa de crescimento da demanda de energia em uma escala global nas últimas décadas, fica claro que o consumo energético tem crescido em ritmo acelerado, e boa parte da demanda vem sendo suprida pela utilização de combustíveis fósseis (EIA, 2016). Considerando que estes combustíveis têm grande impacto na contaminação do ar e no aquecimento global, há urgência no incentivo e no aperfeiçoamento da utilização de fontes de energia renováveis, dentre as quais a biomassa desponta como uma das mais relevantes e promissoras no cenário brasileiro.

No Brasil, dentre as diversas biomassas disponíveis, merecem destaque aquelas provenientes de resíduos agrícolas, como cascas, bagaços e palhas. Conforme o BEN - Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2016), a parcela correspondente à biomassa na oferta interna de energia elétrica é da ordem de 7,3%, sendo que na oferta total de energia primária essa participação é de aproximadamente 27,9% (comparado a 39,4% de participação do petróleo e 13,5% do gás natural, por exemplo). Estes valores denotam a relevância da biomassa no cenário energético brasileiro, e o grande potencial para o aumento destas participações.

Dentre as diversas biomassas existentes, as lignocelulósicas são as biomassas de origem vegetal, compostas basicamente por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas, e são a matéria-prima mais abundante para produção de biocombustíveis e para conversões termoquímicas disponíveis atualmente, com potencial relevante na substituição de combustíveis fósseis. Estas biomassas podem ser provenientes de qualquer vegetal, sendo comumente encontradas como resíduos de agricultura ou de algumas atividades industriais (serragens, resíduos florestais), por exemplo. As principais vantagens na utilização das biomassas lignocelulósicas são (BRAZ, 2014; LOURENÇO, 2012):

- Emissão teoricamente neutra de CO₂, em função do ciclo do carbono e do crescimento fotossintético dos vegetais;
- Baixas emissões de SO_x e NO_x em conversões térmicas, em função dos baixos teores de enxofre e nitrogênio usualmente encontrados nas biomassas lignocelulósicas;
- Benefícios sociais e ambientais, através do aproveitamento de resíduos (o que potencializa a viabilidade econômica) e do incentivo à geração de empregos e à atividade econômica nas zonas rurais.

No contexto das aplicações de biomassas, a tecnologia de leito fluidizado é uma das mais promissoras no que tange à conversão de biomassas em energias úteis, como energia

elétrica ou trabalho, seja através da queima, da pirólise ou da gaseificação (LOURENÇO, 2012). A preferência pela utilização de reatores de leito fluidizado se dá em função de suas características vantajosas, tais como elevadas taxas de transferência de calor, contato gás-sólido favorável, temperaturas homogêneas no leito e a possibilidade de emprego de partículas com propriedades variadas (diâmetro médio, massa específica, morfologia, etc.). (LOURENÇO; TANNOUS, 2015).

As partículas de biomassas lignocelulósicas geralmente apresentam características físicas e morfológicas bastante variadas e particulares, fazendo com que boa parte dos modelos matemáticos conhecidos e desenvolvidos para fluidização de partículas esféricas ou homogêneas não seja aplicável. A utilização de modelos usuais de fluidização frequentemente implica em erros significativos no cálculo de parâmetros de interesse para a fluidização de biomassas, o que é evidenciado em diversos trabalhos na área encontrados na literatura, como os de Fotovat et al. (2015), Fotovat, Chaouki e Bergthorson (2013) e Miao et al. (2011).

Os modelos geralmente utilizados para previsão do comportamento de partículas em fluidização se baseiam na caracterização física destas partículas (granulometria, massa específica e esfericidade, por exemplo). No entanto, particulados de biomassas lignocelulósicas geralmente apresentam morfologias complexas, muito diversas do formato esférico para o qual tendem os particulados inertes usuais, como evidenciado por Lourenço e Tannous (2015). Isso impede que os métodos usuais de caracterização forneçam bons resultados quando aplicados a biomassas. Alguns estudos evidenciam que o comportamento fluidodinâmico de particulados de biomassas é fortemente afetado pela morfologia e pelo teor de umidade, como mostrado por Fotovat, Chaouki e Bergthorson (2013) e por Lourenço e Tannous (2015).

1.1 OBJETIVOS

O trabalho se propõe a correlacionar, através de regressão linear múltipla, as velocidades características de fluidização de misturas binárias de biomassas lignocelulósicas e areia com suas características físicas e físico-químicas, propondo novas correlações em função das características identificadas como mais relevante na predição do comportamento fluidodinâmico.

1.1.1 Objetivos Específicos

- a) comparar os resultados experimentais com os calculados por correlações disponíveis na literatura, para diferentes misturas de biomassas;
- b) desenvolver uma análise estatística do efeito de características físicas e físico-químicas dos materiais nas velocidades características de fluidização de misturas de biomassas e inerte;
- c) propor novas correlações para as velocidades características de fluidização, que utilizem apenas os parâmetros mais relevantes encontrados na análise estatística.

1.2 JUSTIFICATIVA

O aumento da participação de energias renováveis na matriz energética global passa obrigatoriamente pela viabilização econômica do seu emprego. Essa viabilização, por sua vez, depende da avaliação do potencial de utilização de determinadas biomassas nas aplicações de interesse, e, conseqüentemente, de estudos como o de comportamento fluidodinâmico destes materiais, a fim de assegurar a eficiência dos processos. É necessário, portanto, que seja investigado o comportamento de fluidização de misturas binárias de biomassa e inerte, identificando as misturas com melhor desempenho fluidodinâmico, a própria necessidade de utilização de um inerte, as velocidades características de fluidização e o regime de operação do leito, características estas essenciais em um projeto comercial, por exemplo.

As correlações existentes na literatura para prever as velocidades características de fluidização de misturas de biomassa e inerte geralmente apresentam erros elevados, resultando em pequena relevância prática nas aplicações destas misturas. Neste contexto, a avaliação de outras modelagens e variáveis independentes na predição destas velocidades características é de grande importância para a viabilização técnica e econômica do emprego destas biomassas.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho trata de um estudo experimental sobre o comportamento de fluidização de misturas binárias de biomassas e areia, buscando identificar correlações deste comportamento com as propriedades físicas, físico-químicas e morfológicas dos materiais utilizados.

O capítulo 2 deste trabalho apresenta uma breve descrição sobre o processo de fluidização em leitos formados por partículas homogêneas e misturas heterogêneas, e são apresentadas as correlações empíricas utilizadas na determinação das velocidades características teóricas de fluidização.

No capítulo 3 discute-se a importância das biomassas utilizadas e as propriedades físicas, térmicas e físico-químicas a serem determinadas na sua caracterização. No capítulo 4 é apresentado o método utilizado para a análise estatística e correlação dos resultados, bem como os requisitos para sua aplicação. O capítulo 5 aborda a metodologia empregada para realizar a preparação das amostras, a caracterização dos materiais e os experimentos de fluidização. A aplicação do método de análise estatística e correlação dos resultados é detalhada.

No capítulo 6, apresentado em formato de artigo, são expostos os resultados encontrados na caracterização dos materiais, nos testes de fluidização e na comparação das velocidades características de fluidização experimentais com as obtidas através de correlações da literatura. O capítulo 7, também em formato de artigo, apresenta os resultados da análise estatística, e apresenta as correlações propostas em função dos resultados desta análise. O capítulo 8 apresenta as conclusões relevantes alcançadas neste trabalho.

2 FLUIDIZAÇÃO

A fluidização pode ser definida como a operação através da qual partículas sólidas passam a apresentar um comportamento de fluido através da sua suspensão em função do escoamento de um gás ou líquido, sem sofrer arraste. (BASU, 2006). Quando o fluido escoar com velocidade baixa através dos espaços vazios entre as partículas sólidas em um leito, sem chegar a causar a sua suspensão, o processo é denominado de escoamento em leito fixo. À medida que a velocidade de escoamento do fluido aumenta, as partículas sólidas passam a apresentar uma agitação que causa a expansão do leito e, com aumento ainda maior da velocidade do fluido, a ponto de suspender as partículas sólidas, ocorre a fluidização do leito de partículas sólidas. A suspensão das partículas ocorre a partir do momento em que a força de arrasto associada à interação entre o fluido escoando e as partículas se iguala ao peso aparente destas partículas. (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Conforme Basu (2006), partículas sólidas e esféricas em um leito fluidizado apresentam características semelhantes às de um líquido:

- a) a pressão estática em qualquer altura do leito é aproximadamente igual ao peso dos sólidos do leito por unidade de área da secção transversal acima deste nível;
- b) um objeto com massa específica maior do que a massa específica aparente do leito irá afundar, enquanto um com massa específica menor flutuará;
- c) a superfície do leito mantém um nível horizontal, independente de como o leito é inclinado. Além disso, o leito assume a forma do recipiente no qual está contido;
- d) as partículas sólidas são bem misturadas e o leito mantém uma temperatura praticamente uniforme em toda a sua extensão.

2.1 FLUIDIZAÇÃO DE PARTÍCULAS HOMOGÊNEAS

2.1.1 Regimes de Fluidização

Conforme Basu (2006), os regimes de fluidização podem ser classificados da seguinte forma: leito fixo, leito borbulhante, leito turbulento, fluidização rápida e transporte pneumático. Os regimes de fluidização variam em função das características do fluido (como massa específica e viscosidade, por exemplo), do sólido (granulometria e formato das partículas e sua massa específica) e ainda do equipamento de fluidização (temperatura e vazão de fluido, compactação e mistura inicial do leito, altura e diâmetro do leito, entre outros).

Conforme Oka (2004), a fluidização inicia no momento em que a velocidade do fluido é suficiente para manter o sólido particulado em suspensão. O ponto no qual se inicia este fenômeno é chamado de estado de mínima fluidização.

2.1.1.1 Leito Fixo

Conforme Basu (2006) e Cremasco (2012), um leito fixo consiste em um leito de partículas estacionárias, através das quais ocorre a passagem de um fluido. Na movimentação de um leito fixo, os sólidos podem mover-se em relação às paredes da coluna de fluidização, mas não se movem uma em relação à outra. Quando o fluido escoar através de um leito fixo de sólidos, o escoamento exerce uma força de arrasto sobre as partículas, provocando uma queda de pressão através do leito.

2.1.1.2 Leito Borbulhante

Conforme Basu (2006) e Cremasco (2012), se a vazão de fluido através do leito é aumentada, a queda de pressão devido ao arrasto de fluido continua a aumentar até que a velocidade superficial do fluido atinja um valor crítico, conhecido como a velocidade mínima de fluidização, U_{mf} . Nesta condição, a resistência ao escoamento do fluido, ou perda de carga ao longo do leito, é igual ao peso do leito de partículas menos o seu empuxo, e o leito fixo transforma-se num leito fluidizado incipiente. Neste estado o corpo de sólidos se comporta como um líquido.

Este regime se caracteriza, ainda, pela expansão do leito e consequente formação de bolhas (espaços vazios com poucas ou nenhuma partículas sólidas), que 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.

2.1.1.3 Leito Turbulento

Segundo Basu (2006) e Cremasco (2012), conforme a velocidade do fluido através de um leito fluidizado borbulhante é aumentada acima da velocidade mínima de borbulhamento, o leito expande gradualmente. O aumento contínuo na velocidade leva a uma mudança no padrão de expansão do leito, indicando uma transição para o regime turbulento de fluidização. A transição de leito borbulhante para leito turbulento pode ocorrer devido ao aumento da taxa

de formação de bolhas, à uma expansão da fase de emulsão ou ainda à redução da espessura das paredes de emulsão que separam as bolhas.

No regime de leito turbulento, a fase de bolha perde sua identidade devido à rápida formação e dissolução das bolhas. Este fenômeno resulta em um leito bastante ativo e altamente expandido, com uma mudança no padrão de expansão do leito: a turbulência passa a lançar partículas acima da superfície do leito. Desta forma, a superfície do leito passa a ser difusa e indefinida.

2.1.1.4 Fluidização Rápida

O regime de fluidização rápida pode ser descrito como um regime que se situa entre a fluidização turbulenta e o transporte pneumático. Em um leito fluidizado rápido típico, observa-se uma suspensão de aglomerados de partículas que se movem e são arrastados pelo escoamento do fluido. Quando a velocidade do fluido é muito maior que a velocidade de mínima fluidização, a velocidade de transporte das partículas é alcançada e as mesmas são arrastadas para fora do leito; este processo é chamado de elutriação.

Caso seja empregado algum dispositivo que permita o retorno das partículas de volta para o leito, o processo passa a ser chamado de leito fluidizado circulante (LFC). Conforme Cremasco (2012) e Basu (2006), neste regime a queda de pressão é reduzida em relação aos regimes borbulhante e turbulento, e varia de acordo com a vazão mássica recirculante de partículas. Esta redução na queda de pressão se dá principalmente em função da redução da quantidade de partículas no interior do leito.

2.1.1.5 Transporte Pneumático

Segundo Basu (2006) e Cremasco (2012), o regime de transporte pneumático passa a ocorrer no momento em que a velocidade de escoamento do fluido se torna maior do que a velocidade terminal de todas as partículas do leito.

2.1.2 Transição de Regimes de Fluidização

Conforme Basu (2006), a transição entre os regimes de fluidização é afetada por uma série de parâmetros, tais como o tamanho das partículas, a massa específica das partículas, a viscosidade e a massa específica do fluido e o tamanho do leito. A Figura 2.1 é uma

representação qualitativa de transição destes parâmetros em função da velocidade superficial do fluido. A Figura 2.1, mostra, por exemplo, que a faixa operacional para o regime de fluidização rápida se reduz para partículas maiores ou mais densas, enquanto a tendência à ocorrência de *slugging* (ou pistonamento) aumenta.

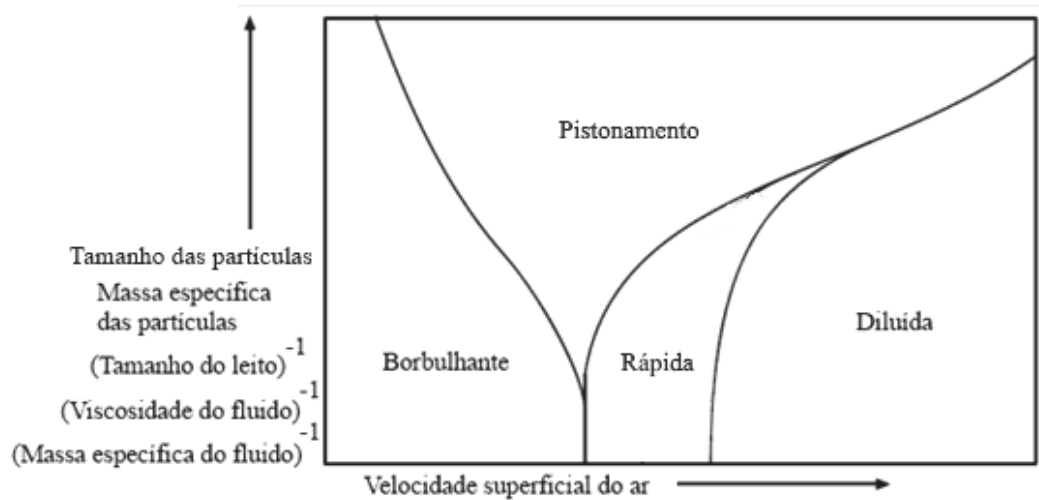


Figura 2.1 - Diagrama de transição de regimes de fluidização

Fonte: Adaptado de Basu (2006).

2.1.3 Classificação de Geldart para Partículas Sólidas

Geldart (1973) desenvolveu um critério de classificação de partículas sólidas a partir do seu comportamento na fluidização. A classificação se dá em função da diferença entre a massa específica aparente das partículas sólidas (ρ_s) e a massa específica do gás (ρ_g), e do diâmetro médio das partículas, conforme mostrado na Figura 2.2. Na Figura 2.2 o eixo das abscissas representa o tamanho médio das partículas sólidas e o eixo das ordenadas representa a diferença de massa específica entre as partículas sólidas e o fluido.

A classificação de Geldart é importante para a previsão do comportamento de fluidização de partículas sólidas, porque partículas de diferentes grupos podem se comportar de maneira totalmente diferente em condições operacionais semelhantes.

As partículas do grupo A estão tipicamente na faixa de 30 a 100 μm (para ρ_s da ordem de 2500 kg/m^3). Estas partículas fluidizam bem, mas o leito expande consideravelmente quando a velocidade mínima de fluidização é ultrapassada, mesmo antes que a formação de bolhas comece a ocorrer. Muitos sistemas de leito fluidizado circulantes usam partículas do grupo A, cujo exemplo típico é a alumina. (BASU, 2006).

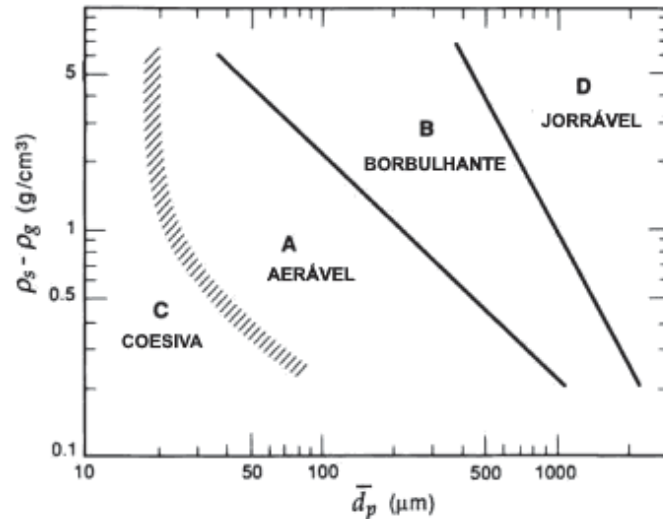


Figura 2.2 - Diagrama de Geldart para classificação de partículas sólidas na fluidização

Fonte: Adaptado de Geldart (1973).

As partículas do grupo B estão normalmente na faixa de 100 a 500 μm (para ρ_s da ordem de 2500 kg/m^3). Estas partículas fluidizam bem, e a formação de bolhas inicia assim que a velocidade mínima de fluidização é excedida. A maioria das caldeiras de leito fluidizado utiliza este tipo de partículas. A areia é um exemplo típico deste grupo de partículas.

As partículas do grupo C são muito finas e são tipicamente menores do que 30 μm (para ρ_s da ordem de 2500 kg/m^3), como o cimento, por exemplo. As forças entre as partículas são comparáveis à força gravitacional sobre estas partículas. Assim, este grupo de partículas é muito difícil de fluidizar, em função da frequente ocorrência de caminhos preferenciais no leito.

As partículas do grupo D são as mais grosseiras na classificação de Geldart, com tamanho médio de partícula maior do que 500 μm para ρ_s da ordem de 2500 kg/m^3 . Este grupo requer uma velocidade de escoamento muito maior para alcançar o regime de fluidização. Conforme Basu (2006), algumas caldeiras de leito fluidizado borbulhante operam com este grupo de partículas.

2.2 FLUIDIZAÇÃO DE MISTURAS

Uma vez que o processo de fluidização promove elevadas taxas de transferência de calor e massa e altas taxas de reação química entre as partículas sólidas e o meio fluido, a fluidização encontra diversas aplicações industriais em muitos processos de engenharia.

Assim, a utilização de tecnologia de leito fluidizado em processos para conversão de biomassas em combustíveis ou energia, tais como combustão, pirólise e gaseificação, aumenta devido às múltiplas vantagens desta tecnologia (PAUDEL; FENG, 2013).

No entanto, as partículas de biomassa, especialmente as que apresentam forma irregular, são difíceis de fluidizar devido às suas geometrias, tamanhos e massa específicas peculiares (por exemplo, partículas grandes, com baixa massa específica e com geometria bastante irregular). A fim de facilitar o processo de fluidização de biomassas, pode-se utilizar outro material em conjunto com estas partículas, que também deve atuar como um meio de transferência de calor no reator. A areia é o material auxiliar mais amplamente utilizado, dado o seu baixo custo, alta disponibilidade e boas características de fluidização (PAUDEL; FENG, 2013).

Assim, a compreensão da dinâmica de fluidização de misturas de biomassa e inertes é importante para a concepção e operação otimizadas de um equipamento de leito fluidizado. Neste contexto, as velocidades características de fluidização são alguns dos parâmetros mais importantes ao projetar ou operar um leito fluidizado. Estas velocidades estabelecem os limites inferior e superior na vazão de fluido requerida para a fluidização. Há, na literatura, diversos estudos de fluidização de partículas inertes, como areia, alumina e esferas de vidro. Algumas correlações empíricas para a velocidade mínima de fluidização, como a equação de Ergun e a equação de Wen-Yu (WEN; YU, 1966) foram desenvolvidas e mostram bons resultados. No entanto, conforme Paudel e Feng (2013) e Lourenço e Tannous (2015), os estudos relacionados com a biomassa são relativamente novos e limitados, não havendo consenso sobre as correlações mais adequadas para a predição das velocidades características de fluidização de biomassas puras ou de misturas de biomassa e partículas inertes.

2.2.1 Velocidades Características de Fluidização

O comportamento da fluidização em um leito operando com uma mistura de partículas depende principalmente das características físicas e morfológicas destas partículas e da velocidade de escoamento do fluido. Assim, com determinadas velocidades de escoamento do fluido pode ocorrer a mistura ou segregação das partículas, ou a fluidização de apenas um dos componentes da mistura, por exemplo. Conforme Lourenço e Tannous (2015), o método tradicional para determinação dos limites de transição entre os estados de fluidização considera a queda de pressão total do leito como uma função da velocidade superficial do

fluido. Assim, os diferentes estados de fluidização podem ser definidos por velocidades características de fluidização.

A Figura 2.3 exemplifica as curvas de fluidização típicas para partículas homogêneas e misturas heterogêneas, como as misturas de biomassas e inerte. Nesta figura, o eixo das ordenadas apresenta os valores de queda de pressão ao longo do leito, e o eixo das abscissas apresenta a velocidade superficial do fluido.

Na Figura 2.3, as velocidades características apresentadas são as seguintes:

- a) U_{if} representa a velocidade inicial de fluidização, que corresponde ao início do movimento do leito. Nas misturas de biomassas e inerte, este movimento inicial ocorre nas partículas inertes, não havendo flutuações significativas de pressão. Abaixo desta velocidade, a queda de pressão diminui linearmente com a velocidade do gás;
- b) U_{mf} representa a velocidade mínima de fluidização para as partículas homogêneas. Nessa velocidade as partículas iniciam a flutuação e se a velocidade do fluido continuar aumentando, a queda de pressão ao longo do leito se mantém constante;
- c) U_{af} representa a velocidade de fluidização aparente, comumente definida como a velocidade mínima de fluidização da mistura, e identificada graficamente pela intersecção entre estados fixos e fluidizados, como indicado pela U_{mf} para partículas homogêneas;
- d) U_s representa a velocidade de segregação, correspondente à zona totalmente defluidizada na camada superior ou inferior do leito (estados “c” e “g” da Figura 2.4). Na fluidização de misturas com alta fração mássica de biomassa, as partículas com menor massa específica comumente segregam na camada superior do leito;
- e) U_{cf} indica a velocidade de fluidização completa da mistura, definida como a velocidade em que a queda de pressão é constante e igual ao peso aparente do leito dividido pela área da secção transversal da coluna, correspondendo à suspensão completa das partículas no leito.

Cabe ressaltar que alguns autores, como Paudel e Feng (2013) e Cui e Grace (2007) utilizam U_{mf} tanto na fluidização de partículas homogêneas como em misturas, não empregando a nomenclatura U_{af} . No entanto, autores como Tannous et al. (2013) e Lourenço (2012) fazem distinção entre estas velocidades características, empregando U_{mf} exclusivamente na fluidização de partículas homogêneas e U_{af} na fluidização de misturas,

conforme a Figura 2.3. Neste trabalho, optou-se pelo emprego de U_{mf} , tanto para fluidização de partículas homogêneas como para misturas de biomassa e inerte.

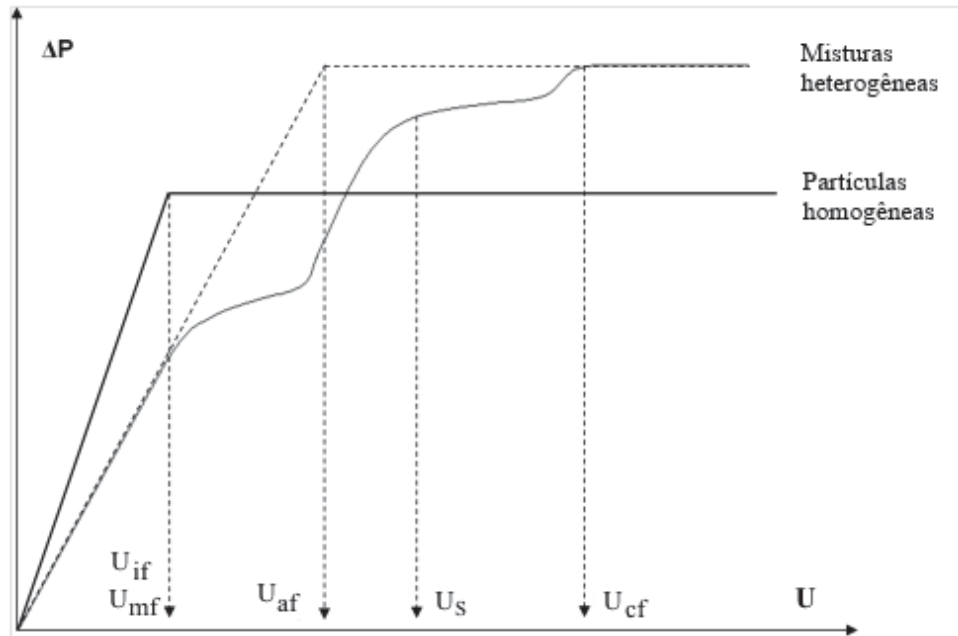


Figura 2.3 - Curvas de fluidização típicas para partículas homogêneas e misturas

Fonte: Adaptado de Lourenço e Tannous (2015).

2.2.2 Mistura e Segregação de Partículas

Segundo Lourenço e Tannous (2015), a fluidização de misturas de biomassa e inerte é suscetível aos fenômenos de mistura e segregação destas partículas. Estes fenômenos são influenciados fortemente pelas massas específicas e tamanhos médios das partículas, bem como pela fração de biomassa na mistura. A segregação não é desejável em um leito fluidizado, pois acarreta a diminuição do contato entre as diferentes partículas da mistura, o que pode levar a heterogeneidades no leito e menores taxas de transferência de calor e massa, por exemplo. Portanto, este fenômeno precisa ser conhecido para que possa ser evitado.

A Figura 2.4 mostra duas condições representativas de misturas de biomassa e inerte em um leito fluidizado, que inicialmente está bem misturado. Na Figura 2.4, os estados (a) a (d) representam o primeiro caso, em que a mistura é composta de partículas de biomassa grandes e leves, e o inerte apresenta partículas pequenas e com elevada massa específica, mais pesadas. Este é um cenário bastante típico em misturas de biomassa e inerte.

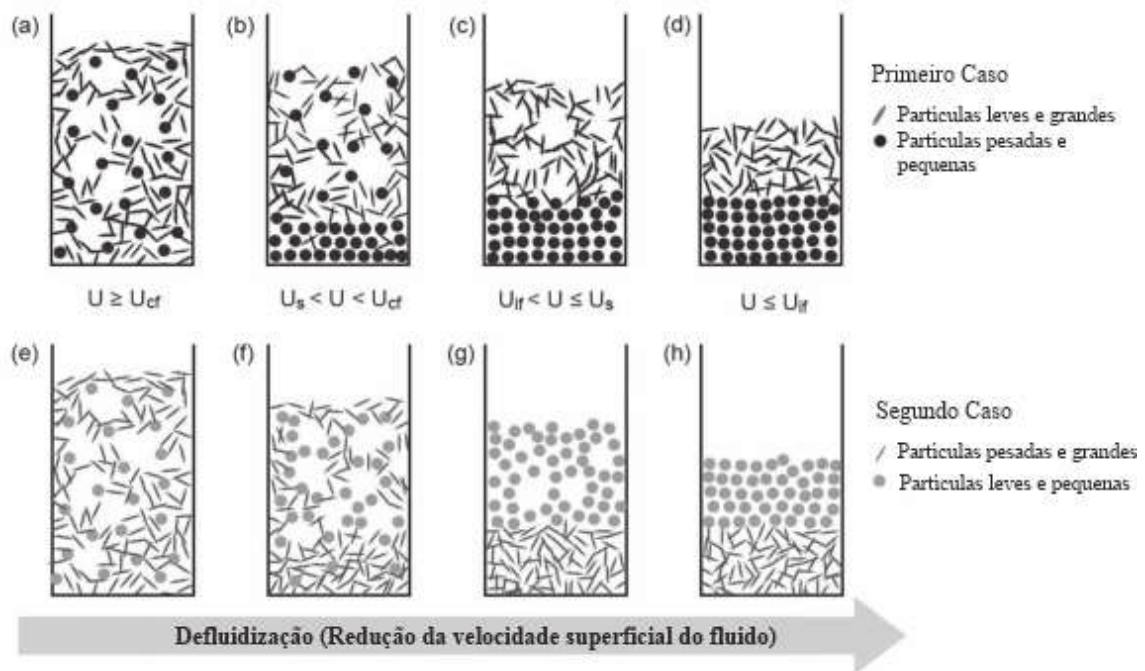


Figura 2.4 - Comportamento das partículas na fluidização de misturas com e sem segregação
 Fonte: Adaptado de Lourenço e Tannous (2015).

No segundo caso da Figura 2.4, os estados (e) a (h) apresentam uma mistura de partículas grandes e pesadas de biomassa e partículas pequenas e leves de inerte. Os estados (a) e (e) mostram os leitos bem misturados. Os estados (b) e (f) evidenciam a segregação parcial de partículas, na qual as partículas mais pesadas começam a se acumular no fundo do leito. Essa condição se dá em velocidades menores do que a de fluidização completa, mas ainda maiores do que a de segregação. Os estados (c) e (g) mostram a evolução da segregação, em que as partículas mais pesadas continuam a se acumular no fundo do leito, e a sua fluidização cessa. Os estados (d) e (h), por fim, representam a condição final da defluidização, com velocidade de escoamento menor do que a inicial de fluidização. Neste cenário, a segregação está completa e o componente mais leve da mistura também já teve sua fluidização cessada.

2.2.3 Influência de Alguns Parâmetros nas Velocidades Características de Fluidização

Grande parte dos trabalhos recentes na literatura envolvendo fluidização de biomassas tem focado na determinação das velocidades características de fluidização e na qualidade da mistura entre biomassa e inerte, avaliando sua segregação sob diferentes condições, como pode ser visto em Ataíde, Cardoso e Oliveira (2013), Cui e Grace (2007) e Fotovat, Chaouki e

Bergthorson (2013). Neste contexto, os principais parâmetros de influência destas variáveis de interesse são as características físicas da biomassa (formato, geralmente denotado pela esfericidade ou pelo diâmetro médio das partículas, massa específica, etc.), a fração mássica de biomassa na mistura e a relação entre os tamanhos das partículas de biomassa e de inerte (LOURENÇO e TANNOUS, 2015).

Com relação às características físicas das partículas, trabalhos experimentais como os de Fotovat, Chaouki e Bergthorson (2013) e Ataíde, Cardoso e Oliveira (2013) têm mostrado que quanto mais próximas forem as propriedades físicas da biomassa e do inerte (como massa específica, por exemplo), menor será a diferença entre as velocidades completa e inicial de fluidização. Quando estas propriedades são muito diferentes, como partículas de biomassa muito maiores e menos densas que o inerte, surge uma larga faixa de velocidades em que a fluidização não é completa, favorecendo a segregação das partículas.

A fração mássica de biomassa na mistura é um parâmetro com grande influência nos regimes de fluidização. Vários trabalhos na área (FOTOVAT; CHAOUKI; BERGTHORSON, 2013; ATAÍDE; CARDOSO; OLIVEIRA, 2013; LOURENÇO; TANNOUS, 2015) sugerem que o aumento da fração mássica de biomassa na mistura tende a aumentar as velocidades características de fluidização, bem como a aumentar a faixa de segregação, aumentando a diferença entre as velocidades inicial e completa de fluidização.

A relação entre os tamanhos das partículas de biomassa e inerte também influencia a fluidização das misturas. Os autores citados sugerem que o aumento da relação de tamanhos também tende a aumentar a zona de segregação, distanciando as velocidades inicial e completa de fluidização.

2.3 CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA AS VELOCIDADES CARACTERÍSTICAS DE FLUIDIZAÇÃO

Conforme Lourenço e Tannous (2015) e Paudel e Feng (2013), diversos autores têm buscado estabelecer modelos empíricos para variáveis de interesse dos processos de fluidização, como a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) de misturas binárias de sólidos ou velocidade de fluidização aparente (U_{af}). Ainda conforme Paudel e Feng (2013), boa parte destes trabalhos publicados utilizou correlações de partículas homogêneas adaptadas para partículas binárias, através da utilização de propriedades calculadas, como diâmetro médio efetivo, esfericidade, massa específica efetiva e porosidade do leito.

Alguns autores (CHIBA et al., 1979; MOURAD et al., 1984 apud TANNOUS; LOURENÇO, 2015) propuseram correlações mais adequadas para misturas, derivadas de acordo com as propriedades e fração mássica dos componentes e características do leito. Em geral, estas correlações utilizam números adimensionais, como Reynolds (representativo da relação entre forças inerciais e viscosas) e Arquimedes (relação entre as forças gravitacional e as forças viscosas).

No caso de misturas contendo biomassa, percebe-se que há uma deficiência na literatura de correlações empíricas e genéricas para determinar as velocidades características de fluidização. Geralmente as correlações existentes têm aplicação limitada às condições e espécies vegetais utilizadas pelos autores. Conforme Lourenço e Tannous (2015) e Paudel e Feng (2013), isso se deve principalmente à dispersão dos dados experimentais disponíveis, causada pela diversidade de condições experimentais existentes, tais como diferentes biomassas, diferentes frações mássicas de biomassa e razões de diâmetro médio nas misturas e diferentes granulometrias, por exemplo.

2.3.1 Velocidade Mínima de Fluidização

Conforme Paudel e Feng (2013), os vários métodos disponíveis na literatura para prever a velocidade mínima de fluidização podem ser classificados em quatro grupos: métodos derivados da queda de pressão, da análise dimensional, da força de arrasto e da velocidade terminal. O método utilizado depende do tipo de partícula ou mistura analisada.

2.3.1.1 Velocidade Mínima de Fluidização para Partículas Inertes

A velocidade mínima de fluidização para partículas inertes pode ser determinada igualando o peso do leito de partículas à força de arrasto, através da relação entre o número de Reynolds e o número de Arquimedes, dada pela Eq. (2.1). Esta equação é conhecida como equação de Ergun.

$$Ar = \frac{1,75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150 (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} (Re_{mf}) \quad (2.1)$$

$$Re_{mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (2.2)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_p} \quad (2.4)$$

$$\phi_s = \frac{\text{área superficial da esfera equivalente}}{\text{área superficial da partícula}} \quad (2.5)$$

Na Eq. (2.1), Ar representa o número de Arquimedes, dado pela Eq. (2.3), ϕ_s representa a esfericidade das partículas, dada pela Eq. (2.5), Re_{mf} representa o número de Reynolds na velocidade mínima de fluidização, dado pela Eq. (2.2) e ε_{mf} representa a porosidade do leito na condição de mínima fluidização, dada em sua forma generérica pela Eq. (2.4).

Na Eq. (2.2) d_p representa o diâmetro médio das partículas, U_{mf} representa a velocidade mínima de fluidização, ρ_g a massa específica do fluido e μ_g a sua viscosidade. Na Eq. (2.4) ρ_{ap} representa a massa específica aparente das partículas e ρ_p a sua massa específica real. Na Eq. (2.5), a esfera equivalente se trata de uma esfera com o mesmo volume da partícula.

A Eq. (2.1) requer a determinação da esfericidade ϕ_s e porosidade do leito ε_{mf} na condição de mínima fluidização. Wen e Yu (1966) propuseram uma forma simplificada da equação de Ergun baseada em dados experimentais, dada pela Eq. (2.6), em que K_1 e K_2 são dados pelas Eq. (2.7) e (2.8), respectivamente.

$$Ar = K_1 Re_{mf}^2 + K_2 Re_{mf} \quad (2.6)$$

$$K_1 = \frac{1,75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \quad (2.7)$$

$$K_2 = \frac{150 (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \quad (2.8)$$

$$Re_{mf} = \left(K_1^2 + K_2 Ar \right)^{0,5} - K_1 \quad (2.9)$$

Para dispensar a utilização de ϕ_s e ε_{mf} , as constantes K_1 e K_2 devem ser obtidas ao ajustar a Eq. (2.6) aos dados experimentais. Assim, o número de Reynolds na condição de mínima velocidade de fluidização pode ser reescrito na forma da Eq. (2.9).

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), K_1 e K_2 permanecem aproximadamente constantes para diferentes tipos de partículas em uma larga faixa de número de Reynolds ($0,001 < Re < 4000$). Outros autores realizaram experimentos para determinação das constantes K_1 e K_2 , e alguns dos resultados encontrados na literatura estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores de K_1 e K_2 para Re_{mf} encontrados na literatura

Autores	K_1	K_2	Materiais
Wen e Yu (1966)	33,70	0,0408	Areia, esferas de vidro e alumina
Richardson (1971)	25,70	0,0365	Areia e esferas de vidro
Saxena e Vogel (1977)	25,30	0,0571	Areia e esferas de vidro
Babu et al. (1978)	25,25	0,0651	Areia, esferas de vidro e alumina
Grace (1982)	27,20	0,0408	Areia e esferas de vidro
Chitester et al. (1984)	28,70	0,0494	Areia e esferas de vidro
Lourenço e Tannous (2015)	33,90	0,0510	Biomassas e areia
Paudel e Feng (2013)	30,28	0,0460	Areia, esferas de vidro e alumina

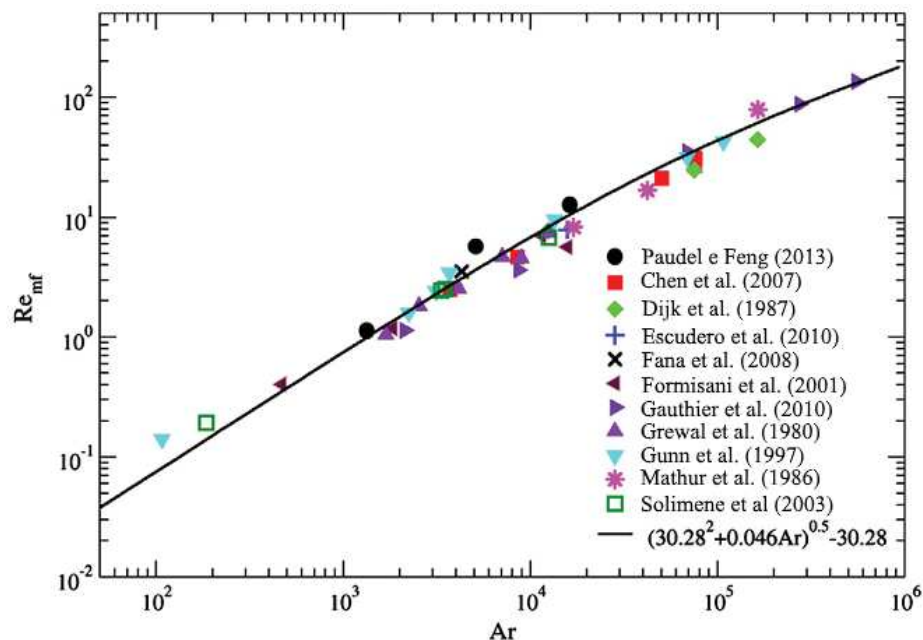


Figura 2.5 - Relação entre Re_{mf} e o número de Arquimedes para partículas inertes

Fonte: Adaptado de Paudel e Feng (2013).

As constantes K_1 e K_2 propostas por Paudel e Feng (2013) na última linha da Tabela 2.1 mostraram-se adequadas para correlacionar os números de Reynolds e Arquimedes na fluidização de partículas inertes, conforme dados experimentais obtidos por alguns autores, disponíveis na literatura. A Eq. (2.9) combinada com as constantes propostas por estes autores resultaram na Eq. (2.10). Os dados experimentais destes trabalhos e os resultados calculados utilizando a Eq. (2.10) estão apresentados na Figura 2.5.

$$Re_{mf} = (30,28^2 + 0,046 Ar)^{0,5} - 30,28 \quad (2.10)$$

2.3.1.2 Velocidade Mínima de Fluidização para Partículas de Biomassa

A fluidização de partículas de biomassa geralmente apresenta um comportamento bastante diverso dos processos envolvendo partículas inertes. Isso se deve, principalmente, à geometria complexa e às propriedades físicas das partículas de biomassa. Paudel e Feng (2013) revisaram os dados experimentais obtidos em alguns trabalhos de fluidização de partículas de biomassa, conforme apresentado na Tabela 2.2. Estes dados foram comparados com os valores calculados através da Eq. (2.10), e estão apresentados na Figura 2.6.

Tabela 2.2 - Trabalhos de fluidização de partículas de biomassa

Autores	Tipo de Biomassa	Diâmetro do Leito [m]
Lourenço e Tannous (2015)	Madeira de eucalipto e endocarpo de tucumã	0,092
Paudel e Feng (2013)	Casca de noz e sabugo de milho	0,145
Abdullah et al. (2003)	Casca de arroz, serragem e casca de amendoim	0,060
Escudero et al. (2010)	Casca de noz e sabugo de milho	0,102
Reina et al. (2000)	Madeiras de demolição e de paletes	0,051
Who et al. (2007)	Bagaço de amêndoa de palma	0,046

A Figura 2.6 mostra que os resultados obtidos com a Eq. (2.10) para a fluidização de partículas de biomassa são mais dispersos do que os valores para partículas inertes. Isso ocorre provavelmente devido às formas, tamanhos e massas específicas peculiares das partículas de biomassa, como o caso, por exemplo, de partículas grandes, com pequena massa específica e formatos extremos.

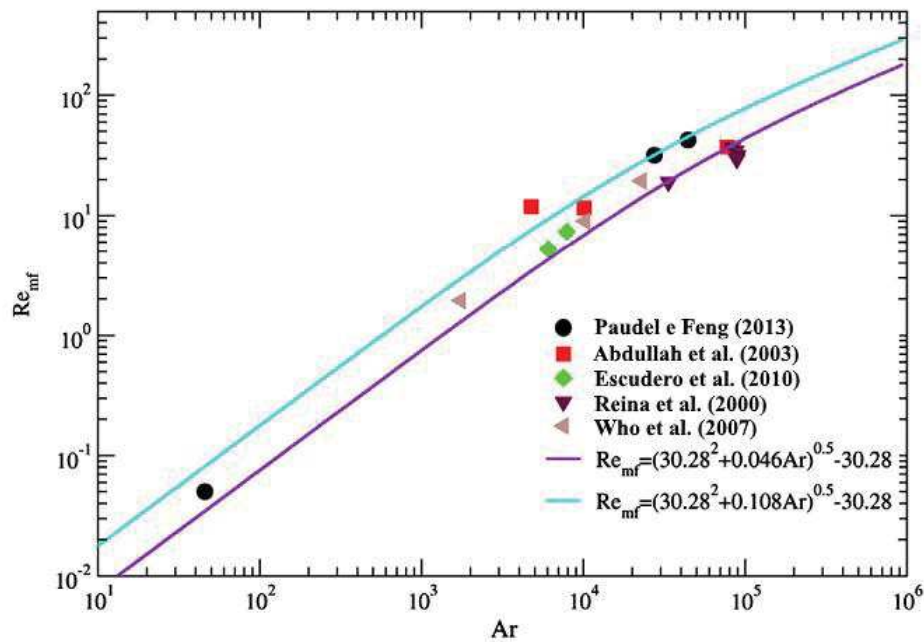


Figura 2.6 - Relação entre Re_{mf} e o número de Arquimedes para partículas de biomassa

Fonte: Adaptado de Paudel e Feng (2013).

Os autores Paudel e Feng (2013) concluíram que a Eq. (2.10) foi capaz de prever razoavelmente bem o comportamento das partículas de biomassa dos trabalhos de Escudero et al. (2010) (casca de noz e sabugo de milho) e de Who et al. (2007) (bagaço de amêndoa de palma). Entretanto, as partículas de casca de amendoim e de serragem utilizadas no estudo de Abdullah et al. (2003) e as de casca de noz e de sabugo de milho utilizadas em seu próprio trabalho apresentaram velocidades mínimas de fluidização sempre maiores do que as previstas pela Eq. (2.10). Assim, os autores Paudel e Feng (2013) propuseram um novo valor para a constante K_2 , de forma a prever de forma mais adequada os valores experimentais de velocidades mínimas de fluidização encontrados na literatura para partículas de biomassa. Esse novo valor de K_2 de 0,108 foi aplicado na Eq. (2.9), resultando na Eq. (2.11), que também está plotada na Figura 2.6.

$$Re_{mf} = (30,28^2 + 0,108Ar)^{0,5} - 30,28 \quad (2.11)$$

2.3.1.3 Velocidade Mínima de Fluidização para Misturas de Biomassa e Inerte

É comum que em processos reais de fluidização ocorra a mistura de partículas inertes, usualmente areia, com a biomassa, pelos motivos já discutidos no item 2.2. Nesta condição de

fluidização de misturas heterogêneas de biomassa, as correlações propostas nos itens 2.3.1.1 e 2.3.1.2 não são capazes de obter bons resultados.

Quando se estuda a fluidização de misturas, é importante utilizar propriedades físicas que descrevam todo o conjunto de partículas presentes no leito. Assim, serão utilizados valores de massa específica efetiva da mistura, ρ_m , dada pela Eq. (2.12), e tamanho médio efetivo das partículas da mistura, d_m , dado pela Eq. (2.13). Esta abordagem para as propriedades efetivas da mistura foi inicialmente proposta por Goossens, Dumont e Spaepen (1971), e passou a ser utilizada por diversos autores (PAUDEL; FENG, 2013; ATAÍDE; CARDOSO; OLIVEIRA, 2013; LOURENÇO; TANNOUS, 2015).

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} \quad (2.12)$$

$$d_m = d_1 d_2 \left(\frac{x_1 \rho_2 + x_2 \rho_1}{x_1 \rho_2 d_2 + x_2 \rho_1 d_1} \right) \quad (2.13)$$

Nas Eq. (2.12) e (2.13), x_1 e x_2 representam as frações mássicas de cada componente da mistura, e ρ_1 e ρ_2 as suas respectivas massas específicas reais. Na Eq. (2.13), d_1 e d_2 representam os tamanhos médios de partícula de cada componente da mistura.

Com este cálculo de propriedades médias efetivas, a mistura passa a ser tratada como um novo componente único, e o número de Arquimedes da mistura, Ar_m , passa a ser calculado em função do tamanho de partícula efetivo da mistura e da massa específica efetiva da mistura, utilizando a Eq. (2.14).

$$Ar_m = \frac{d_m^3 \rho_g (\rho_m - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (2.14)$$

Paudel e Feng (2013) analisaram os dados experimentais obtidos em alguns trabalhos de fluidização de misturas de biomassa disponíveis na literatura, conforme detalhado na Tabela 2.3. Os dados experimentais encontrados nestes trabalhos foram confrontados com os resultados calculados pelas Eq. (2.10) e (2.11), e estão apresentados na Figura 2.7.

A Figura 2.7 mostra que os resultados experimentais de Re_{mf} para misturas de biomassa são bastante mais dispersos do que os encontrados na fluidização de inertes puros ou biomassas puras. Nenhuma das duas correlações propostas, dadas pelas Eq. (2.10) e (2.11),

foi capaz de prever com boa acurácia estes resultados. Os dados de fluidização de casca de arroz, serragem e casca de amendoim de Rao e Reddy (2010), por exemplo, ficaram muito distantes das correlações citadas.

Tabela 2.3 - Trabalhos de fluidização de misturas de biomassa com inerte

Autores	Biomassas	Diâmetro do Leito [m]	Fração mássica de biomassa [%]
Paudel e Feng (2013)	Casca de noz e sabugo de milho	0,145	10 a 90, com incrementos de 10%
Chongdian e Guo (2008)	Talo de trigo e serragem	0,053	20 a 50, com incrementos de 10%
Rao e Bheemarasetti (2001)	Casca de arroz, serragem e casca de amendoim	0,102	2, 5, 10 e 15
Rao e Reddy (2010)	Casca de arroz, serragem e casca de amendoim	0,09	5, 12 e 13

Fonte: Adaptado de Paudel e Feng (2013).

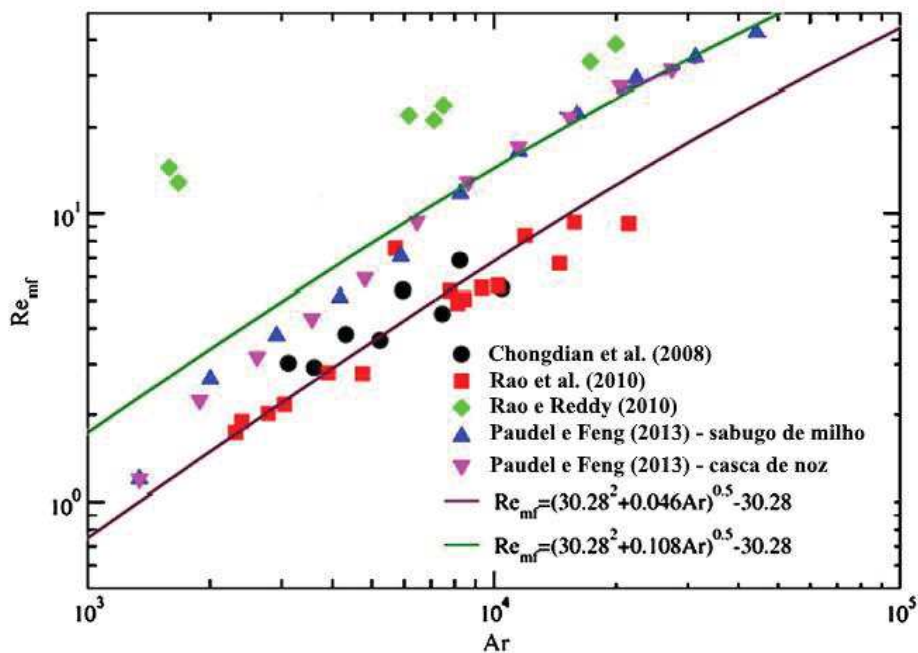


Figura 2.7 - Relação entre Re_{mf} e o número de Arquimedes para misturas de biomassa

Fonte: Adaptado de Paudel e Feng (2013).

Como a fração mássica de biomassa na mistura é um parâmetro de grande influência no comportamento da fluidização, Paudel e Feng (2013) propuseram uma equação que levasse em conta este dado, mantendo a mesma estrutura das Eq. (2.10) e (2.11), que já se mostrou

adequada para fluidização de inertes e de partículas de biomassa puras. O resultado está expresso na Eq. (2.15).

$$Re_{mf} = \{30,28^2 + [0,046(1 - x_b) + 0,108x_b]Ar_m\}^{0,5} - 30,28 \quad (2.15)$$

Analisando a Eq. (2.15), percebe-se que quando a fração mássica de biomassa x_b tende a zero, a expressão tende à Eq. (2.10), proposta para partículas inertes. De forma análoga, quando a fração mássica de biomassa na mistura tende a um, a expressão resultante tende à Eq. (2.11), proposta para biomassa pura.

Paudel e Feng (2013) concluíram que a Eq. (2.15) se ajustou bastante bem aos seus dados experimentais, com erros relativos máximos na faixa de 10%. Os autores concluíram ainda que esta correlação para misturas binárias de biomassa é capaz de prever adequadamente as velocidades mínimas de fluidização também para inertes ou para biomassas puras, em função da fração mássica de biomassa na mistura ter sido considerada na equação.

2.3.2 Velocidades de Fluidização Inicial, Aparente, de Segregação e Completa

Lourenço e Tannous (2015) analisaram os dados experimentais de oito trabalhos disponíveis na literatura envolvendo a fluidização de misturas de biomassas, e propuseram novos valores de K_1 e K_2 para a obtenção teórica das velocidades inicial, aparente, de segregação e de fluidização completa, resultando nas Eq. (2.16) a (2.19).

Velocidade inicial de fluidização, U_{if} :

$$Re_{if} = (15,8^2 + 0,019Ar_m)^{0,5} - 15,8 \quad (2.16)$$

Velocidade de fluidização aparente, U_{af} :

$$Re_{af} = (33,9^2 + 0,051Ar_m)^{0,5} - 33,9 \quad (2.17)$$

Velocidade de segregação, U_s :

$$Re_s = 0,008Ar_m^{1,04} \left(\frac{\rho_m - \rho_g}{\rho_g} \right)^{-0,45} \quad (2.18)$$

Velocidade de fluidização completa, U_{cf} :

$$Re_{cf} = 0,0123 Ar_m^{0,8086} \quad (2.19)$$

Lourenço e Tannous (2015) compararam os resultados preditos pelas Eq. (2.16) a (2.19) com dados de trabalhos experimentais de fluidização de misturas de biomassa e inerte. Os erros relativos absolutos máximos encontrados pelos autores foram da ordem de 17% na aplicação da Eq. (2.16) para determinação da U_{if} , de no máximo 23,5% na determinação da U_{af} através da Eq. (2.17), de no máximo 25,3% na determinação da U_s pela Eq. (2.18) e de até 20,7% na determinação da U_{cf} , através da Eq. (2.19).

3 BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS

As previsões de diversas entidades internacionais, como o World Energy Council (WEC, 2017) e a International Energy Agency (IEA, 2015; IEA, 2016), para o comportamento da demanda global de energia nas próximas décadas apontam para um elevado crescimento. Este aumento na demanda está relacionado com o crescimento populacional esperado (estima-se uma população mundial da ordem de 9 bilhões de pessoas em 2035, conforme a IEA, 2015) e com o aumento do poder aquisitivo nos países em desenvolvimento, o que historicamente está atrelado a um aumento do consumo de energia e da aquisição de bens de consumo.

Como consequência, a preocupação pela garantia do suprimento energético em longo prazo, bem como os impactos da queima de combustíveis fósseis nas mudanças climáticas globais, tem impulsionado a busca por novas alternativas de combustíveis. Uma destas alternativas é a biomassa, que é atualmente a maior fonte de energia renovável no planeta, respondendo por cerca de 10% da produção energética mundial (IEA, 2016).

Biomassa é toda e qualquer forma de energia acumulada através de processos fotossintéticos e de fonte orgânica. Dentre as fontes de biomassa com viabilidade de utilização, têm-se culturas energéticas, resíduos agrícolas e resíduos florestais (IEA, 2015). As culturas energéticas geralmente são densamente plantadas, de alta produtividade e de curta duração como, por exemplo, bambu e trigo. Os resíduos agrícolas são compostos principalmente por caules e folhas que não são colhidos de plantações comerciais, como casca de arroz e palha de cevada, de trigo ou de cana-de-açúcar. Já os resíduos florestais referem-se à biomassa não colhida de locais de exploração madeireira, assim como biomassa resultante de operações de manejo florestal.

A energia contida nas biomassas origina-se do sol, sendo convertida em glicose nas espécies vegetais através da fotossíntese. Quando se considera toda a cadeia de produção vegetal, estima-se que cerca de 1% da energia solar absorvida pela planta está disponível para ser aproveitada através de processos de conversão térmica (ROSA, 2013). O restante da energia é consumido pelas demais funções biológicas do vegetal, na produção e armazenamento da glicose, por exemplo, ou perdida durante a secagem e o transporte da biomassa.

Apesar do baixo aproveitamento de energia solar absorvida, a utilização de biomassas é interessante por representar um ciclo teoricamente fechado de carbono: o carbono oxidado em um processo de conversão térmica de biomassas é liberado na atmosfera na forma de CO₂,

que é um insumo necessário para o crescimento dos vegetais. Desta forma, a emissão líquida de CO₂ na atmosfera é considerada neutra na conversão térmica de biomassas de origem vegetal.

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As células vegetais se caracterizam pela ocorrência de uma parede celular que envolve a membrana celular e fornece à célula suporte estrutural e proteção mecânica. Essa parede é constituída por lignina, hemicelulose e, principalmente, por microfibrilas ricas em celulose (ROSA, 2013), como mostrado na Figura 3.1. Além destes constituintes principais, têm-se uma pequena quantidade de cinzas, que são os materiais inorgânicos, e extrativos, que são açúcares não estruturais, materiais nitrogenados, clorofila e ceras.

A hemicelulose é um polissacarídeo ramificado, responsável pela natureza hidrofílica da biomassa, devido à grande quantidade de hidroxilas presentes nas suas cadeias. A celulose é um polímero constituído de glicoses, e forma uma conexão microfibrrosa com a hemicelulose. Apresenta uma menor quantidade de hidroxilas e maior quantidade energética do que a hemicelulose. A lignina, por sua vez, é um composto fenólico de grande importância energética, localizada entre as paredes da planta e as fibras celulósicas. A lignina é o material que necessita de maior calor para degradação e o grande responsável pelo poder calorífico da biomassa, por apresentar maior cadeia carbônica. (BRAZ, 2014).

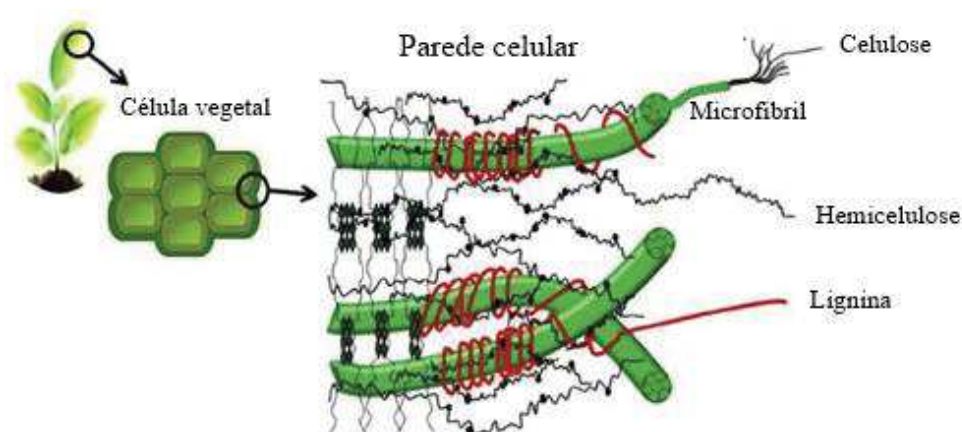


Figura 3.1 - Estrutura celular dos vegetais

Fonte: Adaptado de Rosa (2013).

Tipicamente, a hemicelulose e a celulose representam as maiores frações mássicas da biomassa, variando entre 30% a 40% cada, conforme a Tabela 3.1. São também os primeiros

voláteis a serem liberados durante os processos de conversão: primeiramente a partir de 150°C a 300°C ocorre a volatilização da hemicelulose, podendo ocorrer maior degradação térmica entre 220° e 280°C. Paralelamente, enquanto a taxa de degradação mássica da hemicelulose diminui, ocorre o início da degradação da celulose a partir de 240°C até 350°C. Já a lignina, composto de caráter majoritariamente hidrofóbico, que representa cerca de 20% da estrutura vegetal, pode sofrer degradação térmica na faixa de 280°C a 500°C, não sofrendo grandes alterações a temperaturas menores, podendo servir de agente ligante quando a biomassa é submetida a compressão justamente devido a estas menores alterações em sua estrutura durante a degradação térmica. (ROSA, 2013; FARIAS, 2012).

Tabela 3.1 - Composição química típica de diferentes espécies vegetais

Biomassa	Celulose [%]	Hemicelulose [%]	Lignina [%]
Bagaço de cana	40	24	25
Palha de milho	40	25	17
Sabugo de milho	39	35	15
Fibra de milho	15	35	8
Haste do algodão	31	11	30
Palha de arroz	35	25	12
Palha de soja	25	12	18
Farelo de trigo	10-15	35-39	8-13
Palha de trigo	38	21	23
Joio do trigo	38	36	16
Gramíneas	25-40	35-50	10-30
Madeira de lei (álamo híbrido)	45	19	26
Madeira resinosa (pinho)	45	21	28
Resíduos de papel	76	13	11

Fonte: Yang e Yu, 2013.

3.2 IMPORTÂNCIA ENERGÉTICA

No presente cenário de urgência no aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética mundial, as biomassas representam uma alternativa promissora no fornecimento de energia térmica e na geração termelétrica. Especificamente na geração termelétrica, há diversos trabalhos que buscam viabilizar a coqueima de biomassas diversas com carvão (JURADO et al., 2017; GAN et al., 2017; YANG et al., 2016), facilitando a

transição para uma geração de energia mais limpa em países dependentes deste combustível fóssil.

No entanto, a participação das biomassas na oferta básica mundial de energia é bastante reduzida. Segundos dados de 2014 da IEA em seu relatório Key Renewable Trends (IEA, 2017), apenas 13,8% da demanda primária mundial total de energia foi suprida por fontes renováveis, comparado a 81% oriundos de combustíveis fósseis, como mostrado na Figura 3.2. O carvão responde por 28,5% do suprimento de energia global, apresentando uma tendência de aumento de participação ao longo das últimas décadas, acompanhado pelo gás natural, como mostrado na Figura 3.3, em valores dados em milhões de toneladas de óleo equivalente. A Figura 3.3 mostra ainda que a participação das biomassas se manteve praticamente estável no período.

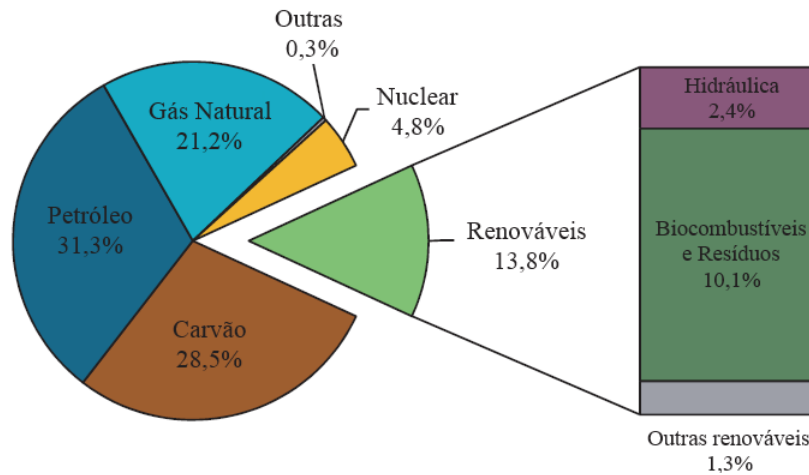


Figura 3.2 - Distribuição da demanda primária mundial total de energia por fontes

Fonte: Adaptado de IEA (2017).

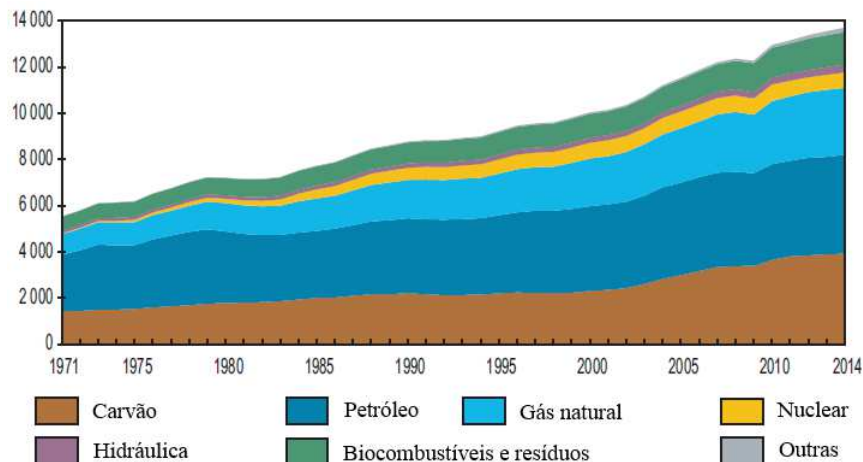


Figura 3.3 - Evolução do suprimento total mundial de energia entre 1971 e 2014

Fonte: Adaptado de IEA (2017).

Quando se analisa as fontes renováveis, aproximadamente 66% da oferta foram provenientes de biocombustíveis sólidos e carvão vegetal (Figura 3.4), participação bastante mais expressiva do que as energias solar e eólica e a geração hidráulica. Estes dados reforçam a importância e o potencial das biomassas na ampliação da participação de energias renováveis na matriz energética mundial.

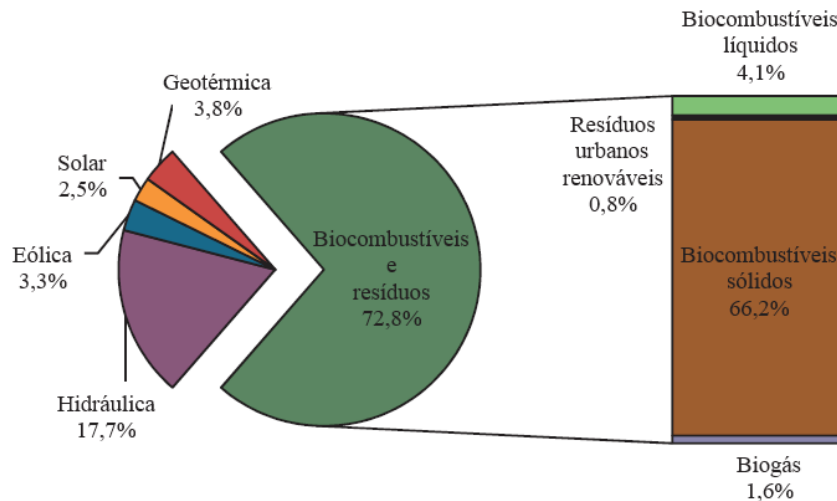


Figura 3.4 - Distribuição da oferta mundial de energias renováveis por fonte

Fonte: Adaptado de IEA (2017).

No Brasil, o cenário é bastante diferente. As energias renováveis têm uma participação expressiva na oferta interna de energia, respondendo por cerca de 41% da oferta total, conforme dados do BEN (BRASIL, 2016). As biomassas oriundas da cana-de-açúcar respondem sozinhas por quase 17% da oferta total de energia, uma participação muito expressiva quando comparada à geração hidráulica, com 11,3%, e com o gás natural, com 13,7%, por exemplo. As demais biomassas têm uma participação de 8% na oferta total de energia no país.

Conforme o Ministério de Minas e Energia do Brasil (BRASIL, 2008) em seu Plano Nacional de Energia 2030, a imensa superfície do território brasileiro, sendo boa parte situada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Além das aplicações na produção de etanol, queima em fornos, caldeiras e outros usos não comerciais, a biomassa apresenta grande potencial no setor de geração de energia elétrica.

3.3 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é cultivada em diversos países, e os subprodutos dos processos de produção de açúcar e etanol representam um grande potencial de biomassa. Conforme Pérez et al. (2014), a geração de biomassa no cultivo da cana-de-açúcar é da ordem de 100 toneladas por hectare plantado. Em termos de composição, a cana-de-açúcar é constituída por três componentes principais: a palha, o bagaço e o açúcar, que se apresentam em proporções semelhantes e representam juntos aproximadamente 42,5% do conteúdo mássico da planta, enquanto o restante é constituído principalmente por água. A composição química da cana é muito variável, dependendo das condições edafoclimáticas da região, condições de cultivo, estágio de maturação, idade da planta, entre outros fatores (SANTOS, 2013).

3.3.1 Bagaço de Cana-de-açúcar

Conforme o BEN (BRASIL, 2016), o bagaço de cana é umas das biomassas mais relevantes na matriz energética brasileira, sendo comumente aproveitado nas próprias usinas de beneficiamento, através do fornecimento de energia térmica e elétrica na produção de açúcar e etanol. O bagaço é o material do caule externo esmagado, formado após a extração do suco da cana. Conforme Pérez et al. (2014), este subproduto representa entre 25% e 40% em massa do total do material processado nas usinas, o que corrobora o potencial energético deste resíduo.

O método mais usual de utilização do bagaço de cana é como combustível para caldeiras de baixa pressão, sendo comumente queimado em grelha. Ainda conforme Pérez et al. (2014), a queima do bagaço em leito fluidizado tem potencial para permitir a operação de caldeiras com maiores temperaturas e pressões de vapor, aumentando significativamente a eficiência da conversão térmica. As baixas eficiências das caldeiras convencionais, da ordem de 15 a 20%, tem sido um empecilho para um melhor aproveitamento do potencial energético do bagaço, uma vez que limitam a viabilidade econômica da utilização deste combustível.

As características químicas do bagaço variam em função de uma série de fatores, tais como o clima na região da lavoura, o tipo de solo, a variedade de cana-de-açúcar, o método de colheita, dentre outros. O bagaço de cana não é, portanto, um material homogêneo.

Em seu trabalho de avaliação do potencial de uso do bagaço de cana em um gaseificador de leito fluidizado borbulhante, Pérez et al. (2014) concluíram que o tamanho de partícula ideal para o bagaço, a fim de manter as velocidades de fluidização em um patamar

considerado adequado pelos autores (entre 0,7 e 0,75 m/s), seria entre 0,8 e 1,2 mm, com porosidade no leito da ordem de 0,58. Este tamanho de partícula determina a necessidade de uma moagem prévia à utilização, uma vez que a biomassa bruta apresenta uma distribuição de tamanhos de partícula bastante variada. Neste trabalho o inerte utilizado foi alumina, com uma massa específica aparente de 1760 kg/m³ e esfericidade de 0,4, tendo um diâmetro médio de partícula de 379 µm. O agente de fluidização foi ar e o diâmetro do reator foi de 500 mm. A fração mássica do inerte nos testes não foi informada. A caracterização do bagaço neste trabalho indicou que o material é composto por fibras e materiais solúveis em água, principalmente açúcar e impurezas. A composição das fibras é, em média, de 50% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina.

Pécora et al. (2014) avaliaram uma série de biomassas para verificar sua aplicabilidade em processos de combustão em leito fluidizado borbulhante, sendo o bagaço de cana uma das biomassas estudadas. Os autores identificaram a composição elementar do bagaço de cana-de-açúcar como sendo de aproximadamente 45% carbono, 4,85% hidrogênio, 0,25% de nitrogênio e 38,5% de oxigênio, com um PCS medido de 17,5 MJ/kg.

Em seu trabalho, os autores Pécora et al. (2014) utilizaram areia como material inerte (tamanho de partícula entre 150 e 1000 µm), fixando uma fração mássica de 5% de biomassa nas misturas. Os ensaios com o bagaço de cana, com diâmetro médio de partícula de 0,24 mm, indicaram uma velocidade mínima de fluidização para a mistura de 0,58 m/s. A velocidade mínima de fluidização para a areia pura utilizada neste trabalho foi de 0,098 m/s.

Ainda segundo os autores Pécora et al. (2014), o bagaço de cana foi a biomassa que apresentou a maior histerese entre as velocidades de fluidização e de defluidização. Este comportamento foi atribuído à alta concentração de partículas finas e ao formato não uniforme das partículas. A histerese indica que as partículas são reorganizadas no processo de fluidização. Devido a estas características do bagaço, os autores concluíram que sua utilização requer um controle mais aprimorado do processo de fluidização, a fim de evitar a segregação da biomassa no leito.

3.3.2 Palha de Cana-de-açúcar

A palha de cana-de-açúcar é um resíduo lignocelulósico produzido em abundância em países tropicais como o Brasil. A palha corresponde às porções foliares e às ponteiros da cana que normalmente são deixados no local do plantio para repor no solo alguns nutrientes minerais absorvidos pela planta durante seu desenvolvimento. Aproximadamente 140

quilogramas de palha em base seca são gerados a cada tonelada de cana-de-açúcar processada. Em termos energéticos, a palha representa aproximadamente 1/3 do potencial energético da cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2014)

A composição química da palha é de 33 a 45% de celulose, 18 a 30% de hemicelulose, 17 a 40% de lignina, 2 a 12% de cinzas e 5 a 15% de extrativos. A palha apresenta um teor de cinzas de duas a quatro vezes maior que o bagaço, variando em função do local e da coleta do material, das condições climáticas, do cultivar e do estágio de desenvolvimento do vegetal (SANTOS et al., 2014).

3.4 MADEIRA DE EUCALIPTO

Conforme a Sociedade Brasileira de Silvicultura - SBS (2017), o eucalipto é a espécie mais usada em reflorestamento no Brasil, tendo sido plantada em 2010 uma área de três milhões de hectares, quase o dobro da cultivada com pinus (um milhão e oitocentos mil hectares), a segunda espécie com maior área plantada. Seu cultivo é destinado principalmente para a produção de chapas de madeira e de celulose.

A partir da década de 1970 teve início uma política de incentivos fiscais para o reflorestamento comercial no Brasil, aumentando os investimentos em pesquisa sobre a silvicultura de diversas espécies, consolidando o uso do eucalipto em plantios comerciais. O Brasil detém hoje tecnologia de ponta na silvicultura do eucalipto, atingindo produtividade da ordem de 60 m³/ha, em rotações de sete anos. A produção florestal sustentável anual no Brasil, referente ao plantio de pinus e eucalipto, atingiu cerca de 191,4 milhões de m³ em 2010, conforme a SBS (2017). A produção de eucalipto representou 74% deste total, e a de pinus 26%.

Quanto à produção sustentável de madeira de eucalipto em tora, 86,3% desta produção (cerca de 123 milhões de m³/ano) concentram-se nas regiões Sudeste, Nordeste e Sul do país. A alta concentração dos plantios deste gênero está associada às indústrias de celulose e papel, siderúrgicas a carvão vegetal, e de painéis de madeira reconstituída. Atualmente o RS é um dos estados com maior área plantada de eucalipto no Brasil, com aproximadamente 280 mil hectares (SANTOS et al., 2016).

Com relação a estudos de fluidização com biomassas de eucalipto, Genehr (2015) utilizou misturas com 20, 30, 40, 60 e 80% em volume de casca de eucalipto em sua pesquisa experimental de fluidização de misturas de biomassa e areia. As partículas de casca de eucalipto apresentaram diâmetro médio de 537,5 µm, com massa específica real de 1,39 g/cm³

e aparente de $0,093 \text{ g/cm}^3$. O autor não conseguiu determinar as curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para misturas com 60 e 80% em volume de biomassa. Para as demais misturas, as velocidades mínimas de fluidização identificadas variaram entre 0,09 e 0,24 m/s. O autor concluiu que as partículas de casca de eucalipto possuem um formato próximo ao retangular e são fibrosas, fazendo com que se aglomerem com facilidade. Nos testes de misturas com mais de 40% em volume de biomassa o autor identificou a formação de canais ao longo do leito, impedindo a fluidização adequada. Por fim, o autor observou que as partículas de eucalipto apresentaram elevada tendência à segregação, dificultando ainda mais a fluidização.

Rousset et al. (2012) compararam o comportamento de fluidização a frio de partículas de madeira de eucalipto antes e depois de um processo de torrefação. Como justificativa para a torrefação, os autores citaram a obtenção de um combustível com uma taxa de combustão mais rápida, menor produção de particulados na combustão e características mais hidrofóbicas do que a biomassa in natura. Segundo os autores, a análise estatística mostrou que a variação da altura estática do leito entre 7 e 10 cm e o processo de torrefação não tiveram impacto significativo no comportamento de fluidização das partículas. Rousset et al. (2012) concluíram, ainda, que os parâmetros com maior influência no processo de fluidização são o tamanho médio das partículas e a sua massa específica aparente.

3.5 CASCA DE ARROZ

O arroz é um dos cereais mais cultivados no mundo, sendo o Brasil o nono maior produtor mundial. A produção de arroz no país na safra de 2009/2010 foi de 11,26 milhões de toneladas, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor nacional, respondendo por cerca de 54% da produção brasileira, conforme o Ministério da Agricultura (BRASIL, 2016).

Conforme Martínez et al. (2011), a casca de arroz representa aproximadamente 20% da massa seca do grão, e a sua disposição final constitui um grave problema ambiental. Atualmente, grande parte da casca de arroz produzida no RS é utilizada na geração termelétrica. Ainda segundo Martínez et al. (2011), os componentes principais da casca de arroz são celulose e hemicelulose (50%) além de lignina (26%) e componentes orgânicos (4%), como óleos e proteínas. A quantidade restante inclui materiais inorgânicos como SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO , CaO , Fe_2O_3 , MnO e P_2O_5 .

Em seu trabalho de avaliação da queima da casca de arroz em leito fluidizado borbulhante, os autores Martínez et al. (2011) utilizaram areia como inerte, com diâmetro

médio de partícula de 0,25 mm. As frações mássicas de biomassa analisadas variaram entre zero e 7,1%. As velocidades mínimas de fluidização fria medidas ficaram na faixa de 0,09 a 0,11 m/s para as misturas de casca de arroz e inerte, sendo de 0,03 m/s para o inerte puro. Os autores concluíram que maiores velocidades de fluidização tendem a reduzir os fenômenos de segregação no leito, incentivando uma melhor distribuição das partículas ao longo do reator. O contraponto identificado foi a redução do tempo de permanência no reator, o que pode influenciar os processos de conversão térmica.

Os autores Pécora et al. (2014) também avaliaram a aplicabilidade da casca de arroz em um processo de queima em leito fluidizado borbulhante. A análise fluidodinâmica foi realizada utilizando areia como inerte (tamanho de partícula entre 150 e 1000 μm), e uma concentração de 5% em massa da biomassa. A análise elementar da casca de arroz indicou uma composição de 39,1% de carbono, 4,1% hidrogênio, 0,30% de nitrogênio e 37,6% de oxigênio, com um PCS medido de 15,4 MJ/kg. Os testes de fluidização indicaram uma velocidade mínima de fluidização para a mistura da ordem de 2,30 m/s. O tamanho médio de partícula utilizado foi de aproximadamente 1,6 mm, o maior dentre as biomassas analisadas no trabalho destes autores. Consequentemente, a massa específica aparente verificada foi a menor dentre as biomassas, com valor medido médio de 114 kg/m^3 , e a velocidade de fluidização foi a maior dentre o grupo das biomassas avaliadas.

3.6 RAMOS DE MACIEIRA

O cultivo da macieira é uma atividade relativamente recente no Brasil. No início da década de 1970, a produção nacional de maçãs era de cerca de 1000 toneladas anuais. Com incentivos fiscais e apoio à pesquisa, a região sul do país aumentou a produção de maçãs em quantidade e em qualidade, fazendo com que o país passasse de importador a autossuficiente e com potencial de exportação. Conforme a Embrapa (2016), a área plantada de macieiras em 2015 no Brasil foi de cerca de 45 mil hectares, com produção estimada de 980 mil toneladas. Um dos fatores que contribuíram para o crescimento da demanda e produção de maçãs no Brasil foi uma mudança regulamentar com vigência a partir de 2013: a liberação do uso de suco de maçã na produção de sucos de outras frutas e refrigerantes (EMBRAPA, 2016).

No Brasil, os tipos da fruta mais produzidos são Gala e Fuji. Os maiores produtores do país são os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A produtividade média da maçã no Brasil varia de 15 a 30 t/ha, considerando pomares adultos. Essa variação de produtividade ocorre em função do espaçamento entre plantas, espécie e manejo. Ainda conforme a

Embrapa (2016), nos pomares adultos não se deve manter ramos muito vigorosos ao longo do eixo central da planta, pois estes dificultam a entrada da luz e prejudicam a eficiência dos tratamentos fitossanitários. Assim, a poda verde é importante para garantir a qualidade da fruta e a produtividade dos pomares.

Os ramos resultantes da poda geralmente são deixados no pomar, servindo como cobertura vegetal para o solo. Não foram encontrados na literatura estudos sobre outras utilizações para este material.

3.7 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

O comportamento do escoamento em leitos fluidizados depende de uma série de fatores, dentre os quais podem ser destacadas as características físicas das partículas sólidas envolvidas, como massas específicas real, aparente e aparente compactada, granulometria, esfericidade, razão de aspecto e ângulo de repouso. As análises empregadas para a caracterização física dos materiais estão descritas a seguir.

3.7.1 Granulometria

O tamanho de partícula tem importância fundamental no contexto do aproveitamento energético de biomassas. Logística, tecnologia, equipamentos e viabilidade econômica da utilização de determinada biomassa estão profundamente relacionados com tamanho da partícula. Processos de redução de tamanho de partícula de biomassas, transporte e armazenamento representam entre 13% e 28% dos custos totais de matéria-prima nos processos de conversão térmica, segundo Miao et al. (2011). Portanto, a caracterização e avaliação de tamanhos adequados de partícula são de grande relevância nos estudos de fluidização de biomassas.

3.7.1.1 Diâmetro Médio de Sauter

Comumente, o tamanho médio de partícula refere-se a um diâmetro teórico, calculado em função de características geométricas da partícula. O diâmetro médio de uma partícula de forma irregular é frequentemente expresso como o diâmetro de uma esfera com um volume ou área de superfície igual à da partícula. Para os casos em que é difícil determinar o volume de uma partícula, pode-se considerar o diâmetro de um círculo circunscrito ou inscrito em

torno da imagem bidimensional da partícula. Os diâmetros equivalentes a estes círculos inscritos ou circunscritos são frequentemente referidos na análise microscópica de partículas como diâmetros de Martin, de Feret e de Crofton.

O diâmetro médio de Sauter d_S é definido como o diâmetro de uma esfera que tem a mesma razão entre volume e área superficial que a partícula de interesse, conforme a Eq. (3.1). Na Eq. (3.1), V_p se refere ao volume da partícula e A_p à área superficial da partícula, de forma que, se a partícula de interesse for esférica, o diâmetro de Sauter e o diâmetro da partícula serão iguais. O diâmetro médio de Sauter é frequentemente utilizado para analisar sistemas envolvendo escoamento de sólidos e fluidos, como fluidização, combustão e reações catalíticas, por exemplo.

$$d_S = 6 \frac{V_p}{A_p} \quad (3.1)$$

O diâmetro médio de Sauter também pode ser determinado através do peneiramento das partículas, utilizando uma sequência de peneiras com abertura padronizada. O diâmetro médio entre as peneiras \bar{d}_{pi} e o diâmetro médio de Sauter d_S podem ser calculados através das Eq. (3.2) e (3.3), respectivamente. Na Eq. (3.2) d_{pi} se refere ao diâmetro de abertura de uma determinada peneira, e d_{pi+1} o diâmetro de abertura da peneira posterior. Na Eq. (3.3), x_{pi} se refere à fração mássica de material retida em cada peneira.

$$\bar{d}_{pi} = \frac{d_{pi} + d_{pi+1}}{2} \quad (3.2)$$

$$d_S = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_{pi}}{\bar{d}_{pi}} \right)} \quad (3.3)$$

Conforme Sauter (1928, apud TANNOUS et al., 2013), é possível provar que os diâmetros resultantes das Eq. (3.1) e (3.3) são equivalentes, sendo tanto mais semelhantes quanto mais esféricas forem as partículas analisadas. Entretanto, a determinação do diâmetro médio através de peneiramento de partículas com formatos extremos pode apresentar elevados valores de incerteza.

Tannous et al. (2013) avaliaram a granulometria de partículas de madeira de *Pseudotsuga menziesii* (abeto de douglas) através de peneiramento e de microscopia. As

partículas analisadas apresentavam formato bastante extremo, com altos valores de razão de aspecto (razão entre comprimento e diâmetro ou largura). Os autores verificaram que o comprimento e largura das partículas foram maiores que o diâmetro médio de Sauter em todas as amostras. A largura das partículas foi até 2,5 vezes maior do que o diâmetro médio, enquanto o comprimento foi até 4 vezes maior. Os autores concluíram que o peneiramento subestima o tamanho real de partículas com formatos extremos, sendo este fenômeno tanto mais perceptível quanto menor forem as partículas. Assim, a determinação do tamanho médio de partículas de biomassa deve ser feita com critério, considerando as limitações do método de peneiramento.

3.7.1.2 Diâmetro Médio de Feret

O diâmetro médio de Feret d_F é definido como a média das distâncias entre pares de retas paralelas tangentes ao contorno projetado da partícula. Os pares de retas devem ser perpendiculares entre si, conforme a Figura 3.5, em que d_{Fh} representa o diâmetro de Feret no sentido horizontal e d_{Fv} no sentido vertical. O diâmetro médio de Feret é dado pela Eq. (3.4).

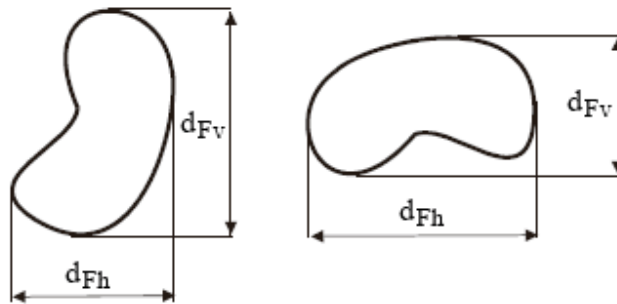


Figura 3.5 - Determinação do diâmetro médio de Feret

$$d_F = \frac{d_{Fh} + d_{Fv}}{2} \quad (3.4)$$

Conforme Olatunde et al. (2016) e Rezaei et al. (2016), o diâmetro médio de Feret representa de forma mais adequada o tamanho característico de partículas de biomassa. Estes autores concluíram, assim como Tannous et al. (2013), que os métodos de peneiramento subestimam o tamanho médio de partículas com formatos irregulares, como as de biomassa.

3.7.2 Razão de aspecto

A razão de aspecto AR de uma partícula é dada pela relação entre a largura da partícula W_p e o seu comprimento L_p , conforme a Eq. (3.5), variando entre 0 e 1. Conforme Tannous et al. (2013) e Olatunde et al. (2016), as partículas resultantes de processos de moagem de biomassas geralmente apresentam AR médio significativamente menor do que 1.

$$AR = \frac{W_p}{L_p} \quad (3.5)$$

3.7.3 Esfericidade

A esfericidade ϕ_s de uma partícula indica o quanto a forma da partícula se aproxima de uma esfera. A esfericidade é definida como área superficial de uma esfera com o mesmo volume da partícula dividida pela área de superfície real da partícula, conforme a Eq. (2.5). A determinação da esfericidade pode ser realizada de forma simplificada através de medidas bidimensionais dos diâmetros de um círculo teórico inscrito d_{CI} e de outro círculo teórico circunscrito na partícula, d_{CC} , conforme Tannous et al. (2013). O círculo inscrito é o maior círculo que se encaixa dentro do limite da partícula. O círculo circunscrito é o menor que engloba toda a área da partícula, conforme a Figura 3.6. A esfericidade pode então ser determinada através da Eq. (3.6).

$$\phi_s = \frac{d_{CI}}{d_{CC}} \quad (3.6)$$

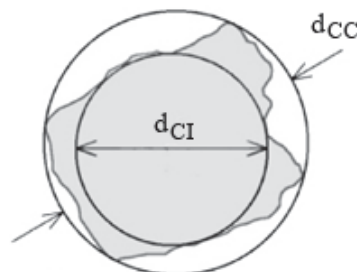


Figura 3.6 - Diâmetros inscrito e circunscrito de partículas irregulares

Fonte: Adaptado de Rezaei et al. (2016).

Olatunde et al. (2016) sugerem que a esfericidade pode ser utilizada para corrigir a estimativa do diâmetro médio de Sauter através de peneiramento, para partículas irregulares. Esta correção está relacionada com a hipótese de partículas aproximadamente esféricas na determinação deste diâmetro médio através de peneiramento. O diâmetro médio de Sauter corrigido pela esfericidade pode ser definido, portanto, pela Eq. (3.7).

$$d_{S, \text{corrigido}} = \frac{d_s}{\phi_s} \quad (3.7)$$

3.7.4 Massa Específica Real

A massa específica real de um determinado material é definida pela razão entre a sua massa e o volume das suas partículas, desconsiderando os espaços vazios ou poros entre essas partículas ou dentro das mesmas. No caso de biomassas, geralmente se utiliza a picnometria a gás hélio para determinar a massa específica real, em função da grande estabilidade química deste elemento.

O picnômetro utilizado emprega gás hélio para preencher os espaços vazios entre as partículas do material cuja massa específica se deseja determinar. Determinando-se o volume necessário de gás para que o corpo de prova esteja totalmente preenchido de amostra e gás, e sabendo-se ainda a massa da amostra medida previamente e a massa específica do gás, o picnômetro informa a massa específica real do material testado. A massa específica real é dada pela Eq. (3.8), em que m_p representa a massa das partículas e V_p o seu volume, desconsiderando vazios e poros.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.8)$$

3.7.5 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente (aerada ou solta) é dada pela razão entre a massa e o volume ocupado pelo material analisado, sendo considerados a porosidade e os espaços vazios entre as partículas. Neste caso, não deve haver compactação das partículas, a fim de não interferir na estrutura dos vazios e poros do material. A massa específica aparente influencia diretamente na viabilidade de utilização de uma dada biomassa, por exemplo, pois relaciona a massa possível de ser transportada em um dado volume.

Conforme demonstrado por diversos autores (FARIAS, 2012; BRAZ, 2014; CHEVANAN et al., 2008), em se tratando de biomassas, na medida em que se aumenta o tamanho das partículas, a massa específica aparente aerada do leito diminui. Para estes autores, a diminuição da massa específica do leito com o aumento do diâmetro médio das partículas se justifica, pois, com o aumento desta grandeza se aumenta a quantidade de espaços vazios entre as partículas, que apresentam um arranjo tipicamente aleatório. Assim, o aumento de espaços vazios leva à diminuição da massa de material para um volume constante e, conseqüentemente, a massa específica aparente do leito se reduz.

A massa específica aparente é dada pela Eq. (3.9), em que V_{ap} representa o volume aparente das partículas, ou seja, considerando os vazios e poros.

$$\rho_{ap} = \frac{m_p}{V_{ap}} \quad (3.9)$$

3.7.6 Massa Específica Aparente Compactada

A massa específica aparente compactada (ρ_{apc}) é determinada de forma semelhante à massa específica aparente, mas acrescentando algum tipo de compactação, que pode ser por vibração ou impacto, por exemplo. Essa compactação reduz os espaços vazios entre as partículas, de forma que a massa específica aparente compactada é sempre maior do que a aerada (ou solta).

Chevanan et al. (2008) sugerem que a compactação por impacto até a estabilização do volume do leito é uma das formas mais práticas para a determinação da massa específica compactada para biomassas. Farias (2012) utilizou essa técnica na determinação das massas específicas compactadas de bagaço de cana, fibra de coco, casca de arroz, cascas de castanha e cavacos de madeira, obtendo resultados coerentes com outros trabalhos da literatura.

3.7.7 Massa Específica do Envelope

A massa específica do envelope é dada pela razão entre a massa e o volume ocupado pelo material analisado, levando em conta a porosidade na medição do volume, mas desconsiderando os espaços vazios entre as partículas. Ou seja, para materiais porosos, a massa específica do envelope será menor do que a massa específica real. Para materiais não porosos, as massas específicas real e do envelope serão iguais.

3.7.8 Ângulo de Repouso Estático

O ângulo de repouso estático α é uma característica física relacionada com o armazenamento a granel em depósitos e armazéns. Farias (2012), reconhecendo a importância desta característica, realizou testes escoando as biomassas testadas através de um funil direcionado acima de uma base plana. A partir do monte acumulado sobre a base, foi possível determinar o ângulo formado entre a superfície do volume acumulado e a superfície horizontal, conforme mostrado na Figura 3.7.

Ainda considerando o trabalho de Farias (2012), todas as biomassas analisadas pelo autor (casca de arroz, fibra de coco, bagaço de cana, casca de castanha e cavacos de madeira) tiveram diminuição do ângulo de repouso estático com o aumento do diâmetro médio das partículas. O autor considerou que isto se justifica pela queda, arranjo e espalhamento das partículas sobre a base de medição, levando a uma diminuição do cume do cone e, conseqüentemente, à redução do ângulo de repouso.

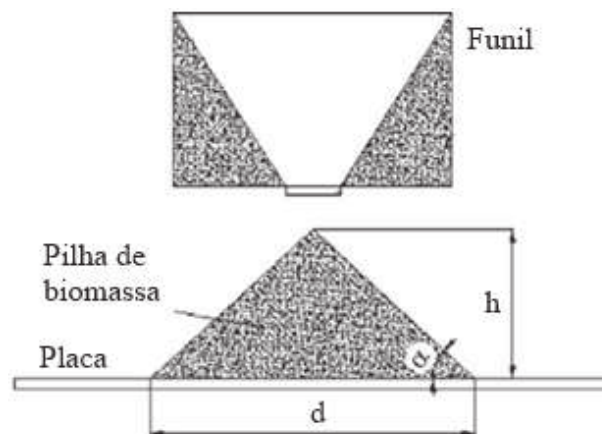


Figura 3.7 - Determinação do ângulo de repouso α

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2010).

3.8 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS

A caracterização físico-química das biomassas avaliadas está descrita a seguir.

3.8.1 Composições Imediata, Elementar e Química

A composição imediata é um resultado de grande relevância na determinação das propriedades e da viabilidade de aplicações de biomassas. Essa análise indica as frações

mássicas de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas da amostra analisada. De acordo com Cortez et al. (2009) estes dados são geralmente disponibilizados em base seca, para aplicação geral, sendo realizada a análise somente após a secagem da amostra em estufa a 105°C.

Os resultados da análise imediata fornecem subsídios para a análise da viabilidade do aproveitamento térmico da biomassa, por exemplo. Uma composição de 70 a 80% de voláteis indica que a biomassa é consumida mais rapidamente na combustão, e um teor de carbono fixo de 20 a 30% indica maior velocidade na queima e com maior formação de chamas. (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008 apud FARIAS, 2012).

A composição elementar é outra característica de grande importância na avaliação da aplicabilidade de biomassas. Os resultados de uma análise de composição elementar são as frações mássicas de carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio e nitrogênio presentes na amostra. A composição elementar da biomassa permite a estimativa da formação de poluentes (CO₂, SO_x, NO_x) durante a combustão, a temperatura adiabática de chama e o poder calorífico do material, que são dados fundamentais para o projeto de caldeiras e queimadores, por exemplo.

A composição química indica os teores de celulose, hemicelulose, lignina, cinzas e extrativos totais dos materiais. A determinação desta composição é importante, uma vez que se trata de uma característica que apresenta grande variabilidade, mesmo dentro de uma mesma espécie vegetal. Os teores de celulose, hemicelulose e lignina de uma determinada biomassa estão relacionados com as suas propriedades físicas, químicas e morfológicas e, portanto, são de grande interesse em um estudo de fluidização, principalmente quando se avalia os processos a quente.

A determinação da composição química de biomassas lignocelulósicas também é de extrema importância para viabilização e otimização dos processos de conversão em biorrefinarias. A obtenção de produtos de alto valor agregado a partir de diferentes tipos de biomassa requer a otimização integrada de uma série de etapas do seu processamento dentro da biorrefinaria, como a otimização das etapas de pré-tratamento, hidrólise, conversão e separação/purificação do produto de interesse (SANTOS et al., 2014).

3.8.2 Poder Calorífico

O poder calorífico representa a quantidade de energia a ser liberada na forma de calor por unidade de massa em um combustível durante uma combustão completa, ou seja, após a completa oxidação deste combustível. Existem duas variações de poder calorífico: o inferior e o superior. O poder calorífico superior (PCS) considera o calor latente de vaporização da água

formada durante o processo de combustão na quantificação do total de energia liberada. O poder calorífico inferior (PCI), por sua vez, não considera este calor latente de vaporização na quantificação da energia liberada. Nota-se, portanto, que o valor do PCS será sempre igual ou superior ao valor do PCI. Uma vez que o calor latente de vaporização da água formada no processo de combustão dificilmente é recuperado em equipamentos reais, o valor de PCI é um dado com maior aplicabilidade prática. O PCS pode ser obtido através do uso de uma bomba calorimétrica adiabática.

O poder calorífico das biomassas é bastante variado, uma vez que sua composição elementar também varia. Farias (2012) encontrou valores de PCS entre 15 e 20 MJ/kg para madeiras diversas e para casca de castanha. O autor não encontrou correlação entre poder calorífico e o tamanho das partículas de biomassa. Braz (2014) encontrou valores semelhantes de PCS para as biomassas que analisou, conforme detalhado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição elementar e poder calorífico superior de algumas biomassas

Biomassa	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]	PCS [MJ/kg]
Casca de Amendoim	41,52	7,43	2,11	0,60	27,96	16,5
Casca de Arroz	31,46	6,67	1,04	0,51	23,03	15,4
Casca de Café	43,13	5,93	1,55	0,67	32,78	16,8
Bagaço de Cana	45,05	5,57	0,25	-	37,91	17,5
Serragem de Pinus	45,95	7,46	0,32	0,60	34,32	17,0
Semente de Tucumã	48,83	6,71	0,88	-	32,30	20,8

Fonte: Adaptado de Braz (2014).

4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A aplicação de uma ferramenta de estatística para a análise dos resultados permite agregar confiança nas conclusões, bem como delinear com clareza a sua significância.

4.1 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A regressão linear múltipla é uma ferramenta aplicável quando se tem mais de duas variáveis de interesse, sendo uma considerada a variável dependente e as demais consideradas variáveis independentes. Este tipo de regressão pode ser aplicado para prever valores da variável dependente ou para identificar quais variáveis independentes têm maior efeito na variável dependente (MCDONALD, 2014).

Quanto à utilização da regressão linear múltipla para predição de resultados, pode-se buscar determinar a velocidade mínima de fluidização de uma mistura de biomassa e areia em função de características como a fração mássica de biomassa na mistura e da composição química da biomassa, por exemplo. A regressão múltipla é utilizada para obter uma equação que correlacione as variáveis envolvidas. Para tanto, deve-se levantar dados suficientes destas variáveis para que a equação obtida apresente um bom ajuste estatístico. Assim, a equação obtida pode ser empregada para prever a velocidade mínima de fluidização de outra mistura de biomassa e areia, desde que sejam conhecidas a composição da biomassa e a sua fração mássica nesta mistura.

Neste contexto, é importante que as variáveis independentes não sejam correlacionadas entre si, uma vez que essa correlação não traz ganhos à significância da equação obtida (MCDONALD, 2014; ZAR, 1999). Por exemplo, utilizar a fração mássica de biomassa na mistura e a massa específica aparente da mistura simultaneamente não seria adequado, uma vez que a massa específica aparente da mistura é calculada em função da fração mássica de biomassa. Neste caso a correlação entre ambas é evidente, mas há casos em que essa relação não é tão explícita, e a análise estatística auxilia na sua identificação.

A regressão linear múltipla pode ser utilizada para estabelecer o grau de relevância das variáveis independentes na predição de resultados para a variável dependente. Este aspecto é importante, pois permite poupar esforços ao eliminar a avaliação de parâmetros de menor importância nos resultados.

Conforme Zar (1999) e McDonald (2014), a hipótese nula de uma regressão linear múltipla é a de que não existe relação entre as variáveis independentes e a variável

dependente. Ou seja, os valores preditos da variável dependente a partir da equação de regressão múltipla não estão mais próximos dos valores reais do que seria esperado por acaso.

O objetivo principal de uma regressão linear múltipla é obter uma equação no formato da Eq. (4.1), que estabelece uma relação linear entre a variável dependente e as múltiplas variáveis independentes. Na Eq. (4.1), \hat{Y} representa o valor esperado da variável dependente Y para um dado conjunto de valores de X ; b_1 representa a inclinação estimada de uma regressão de Y em X_1 , se todas as outras variáveis X_i pudessem ser mantidas constantes, e assim por diante para b_2, b_3 , etc. Ainda na Eq. (4.1), a representa um termo constante que busca minimizar os desvios quadrados entre os valores preditos e reais de Y . A regressão linear múltipla busca, portanto, encontrar os valores dos coeficientes de regressão parcial (b_1, b_2, b_3 , etc.) e do termo constante a . A magnitude dos coeficientes de regressão parcial depende da unidade usada para cada variável, não tendo relação com a relevância de cada variável independente no resultado de \hat{Y} .

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (4.1)$$

O ajuste dos resultados da equação com relação aos dados reais é expresso por R^2 , chamado de coeficiente de determinação múltipla. O R^2 pode variar de 0 a 1; o valor nulo indica a inexistência de relação entre Y e as variáveis X_i , enquanto o valor unitário denota um ajuste perfeito, não havendo nenhuma diferença entre os valores preditos e reais de Y .

Ainda conforme Zar (1999) e McDonald (2014), quando o objetivo da regressão linear múltipla é estabelecer a relevância de cada variável independente, obtém-se uma equação contendo coeficientes de regressão parcial padrão, como a Eq. (4.2).

$$\hat{Y}' = a + b_1' X_1' + b_2' X_2' + \dots + b_n' X_n' \quad (4.2)$$

Na Eq. (4.2), b_1' é o coeficiente de regressão parcial padrão de \hat{Y}' em X_1' , ou seja, é o número de desvios padrão que \hat{Y}' mudaria para cada mudança de um desvio padrão em X_1' , se todas as outras variáveis X_i' pudessem ser mantidas constantes. A magnitude dos coeficientes de regressão parcial padrão tem relação com a relevância das variáveis: as variáveis independentes X_i' com maiores coeficientes de regressão parcial padrão têm uma relação mais forte com a variável \hat{Y}' .

4.1.1.1 Requisitos para Aplicação do Método

Conforme Zar (1999) e McDonald (2014), para garantir a validade dos resultados de uma regressão linear múltipla, os dados a serem analisados devem cumprir oito requisitos fundamentais do método:

- a) a variável dependente deve ser medida em uma escala contínua;
- b) deve haver duas ou mais variáveis independentes, que podem ser contínuas, ordinárias ou nominais;
- c) os dados não devem apresentar valores extremos significativos, ou *outliers*;
- d) os dados devem apresentar independência de observações e, portanto, independência de resíduos. Este critério pode ser verificado através de um teste de Durbin-Watson;
- e) deve haver uma relação linear entre a variável dependente e cada uma de suas variáveis independentes, bem como entre a variável dependente e as variáveis independentes coletivamente. Este requisito pode ser contornado através de manipulações nas variáveis independentes. Por exemplo, pode-se considerar o quadrado da variável, e não o seu valor propriamente dito;
- f) os dados precisam mostrar homocedasticidade, ou seja, as variações ao longo da linha de melhor ajuste permanecem semelhantes;
- g) os dados não devem apresentar multicolinearidade, que ocorre quando se tem duas ou mais variáveis independentes que são correlacionadas entre si;
- h) os resíduos (erros) devem apresentar uma distribuição aproximadamente normal.

Os requisitos “d” a “h” podem ser verificados em um software específico de análise estatística, como o IBM SPSS. Os requisitos “a” a “c” devem ser verificados previamente, antes de se iniciar a análise com qualquer software.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

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

5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

5.1.1 Preparação das Biomassas

Todas as biomassas analisadas foram recebidas *in natura*, e, para permitir sua fluidização e caracterização, foram secas em estufa e posteriormente moídas. O bagaço e a palha de cana-de-açúcar foram provenientes de Pelotas/RS, e foram fornecidos pela EMBRAPA. A madeira de eucalipto foi originária de Guaíba/RS, tendo sido fornecida pela empresa Celulose Riograndense. Os ramos de macieira foram provenientes de Vacaria/RS, e a casca de arroz foi proveniente de Cachoeira do Sul/RS.

A secagem em estufa foi realizada a 105 °C por 8 horas. A moagem foi realizada em um moinho de facas da marca SEIBT, modelo MGHS-270A. Os dois processos foram executados no LCVMAT - Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais da UNISINOS. O aspecto final das biomassas após a preparação pode ser visto na Figura 5.1a para o bagaço de cana e na Figura 5.1b para a palha de cana.



Figura 5.1 - Amostras preparadas de bagaço (a) e palha de cana (b)

5.1.2 Preparação da Areia

A areia utilizada nos testes de fluidização se trata de um material comercial, disponível em lojas de materiais de construção. A areia foi peneirada utilizando a mesma série de peneiras da Tabela 5.1. A fim de garantir um material mais homogêneo, foram utilizados apenas os cortes com maior fração mássica retida, entre as peneiras mesh 40 e 50.

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Os itens 5.2.1 a 5.2.8 detalham a metodologia empregada na caracterização física das amostras analisadas.

5.2.1 Diâmetro Médio de Sauter

O diâmetro médio de Sauter das partículas das amostras foi determinado através de peneiramento no LCVMAT, utilizando um conjunto de peneiras com abertura padronizada seguindo a norma NBR NM-ISO 3310-1, conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Padrão de abertura das peneiras

Malha [mesh]	Abertura [μm]
4	4750
6	3350
12	1700
20	850
30	600
40	425
50	300
70	212
100	150
140	106
200	75
270	53

A fim de evitar a obstrução das peneiras, foram utilizadas amostras de aproximadamente 400 g para areia e 80 g para as biomassas. Após o peneiramento, foram medidas as massas retidas em cada uma das peneiras, e determinadas as suas respectivas

frações mássicas. Este processo foi realizado em triplicata para cada material, e o resultado final foi obtido através de uma média aritmética simples. O diâmetro médio de Sauter foi calculado através das Eq. (3.2) e (3.3).

5.2.2 Diâmetro de Médio de Feret, Razão de Aspecto e Esfericidade

O diâmetro médio de Feret, a razão de aspecto e a esfericidade das partículas foram determinados através do software ImageJ, utilizando a função “Analyze Particles”. Foram utilizadas vinte imagens para cada biomassa, contendo aproximadamente 30 partículas em cada, totalizando cerca de 600 partículas analisadas para cada biomassa. As imagens foram obtidas com aumento de 62x em um equipamento de medição CNC Starret AV300+ e convertidas para escala de cinza 8 bits no ImageJ. As partículas foram selecionadas através da função “Threshold” do software, como mostrado na Figura 5.2. O diâmetro de Feret, a razão de aspecto e a esfericidade foram determinados utilizando a função “Shape descriptors” do programa, e os resultados foram exportados para o Excel para análise.



Figura 5.2 - Imagem de partículas de ramos de macieira com aumento de 62x (a) e selecionadas no software ImageJ (b)

5.2.3 Massa Específica Real

A massa específica real das amostras foi obtida com a utilização de um picnômetro a gás hélio da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340. Este equipamento possui uma precisão de 0,02% e exatidão de 0,03% na leitura. O instrumento atende as normas ASTM

C604-2012 e ASTM D6761-2012. Os ensaios foram realizados no LCVMAT. Foram utilizadas amostras de aproximadamente 2g para as biomassas e 3g para a areia. A pressão de gás hélio utilizada nos ensaios foi de no máximo 20 psig.

5.2.4 Massa Específica Aparente Solta

Para a determinação da massa específica aparente utilizou-se uma balança digital marca BEL modelo M500, com resolução de 0,001 g. As amostras foram colocadas em um béquer de vidro de dimensões conhecidas, e o volume aparente da amostra foi calculado através da medição da altura alcançada no recipiente. Para tanto, utilizou-se um paquímetro marca Mitutoyo, modelo 530312B10, com escala de 150 mm e resolução de 0,02 mm.

As medições da massa específica aparente foram sempre realizadas em triplicata, com volumes diferentes de biomassa no béquer a cada teste. O resultado final utilizado foi a média aritmética simples das três medições.

5.2.5 Massa Específica Aparente Compactada

Na determinação da massa específica aparente compactada, a compactação das amostras foi realizada por impacto, em intervalos de 10 batidas executadas sobre uma superfície rígida. O máximo deslocamento empregado no processo foi da ordem de 0,1 m. A superfície de impacto foi revestida com material emborrachado para proteger as vidrarias. O material foi considerado compactado quando não houve mais alteração da sua altura no recipiente.

5.2.6 Ângulo de Repouso Estático

O ângulo de repouso estático foi determinado utilizando um funil de 100 mL, com diâmetro interno de entrada de 95 mm e de saída de 9 mm. O funil foi posicionado sobre uma superfície rígida e plana, conforme mostrado na Figura 5.3(a). A saída do funil foi fixada a 100 mm da superfície. As amostras foram escoadas gradualmente através do funil, de forma manual, formando uma pilha característica sobre a superfície plana, conforme a Figura 5.3(b). Foram utilizadas amostras de 200 mL para todos os materiais.

O ensaio foi realizado em duplicata para cada biomassa. O ângulo de repouso estático foi determinado utilizando o software ImageJ em duas posições para cada pilha, sempre

defasadas em 180°. O resultado final para o ângulo de repouso para cada biomassa foi a média aritmética simples destas quatro medições.

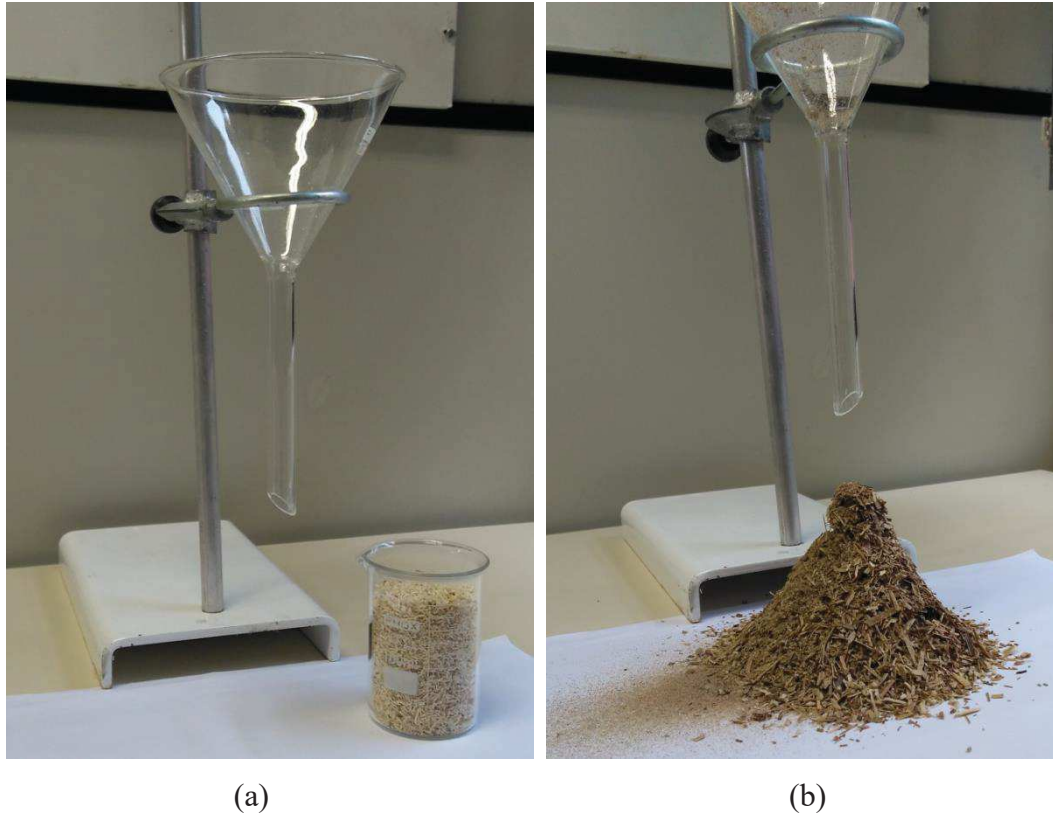


Figura 5.3 - Funil e suporte utilizados no ensaio de ângulo de repouso

5.3 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA E FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS

Os itens 5.3.1 a 5.3.4 detalham a metodologia empregada na caracterização térmica e físico-química das amostras analisadas.

5.3.1 Composição Imediata

A determinação da composição imediata das amostras resulta nos teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo. A determinação da umidade foi realizada de acordo com a norma TAPPI T264om-88. O teor de cinzas nas amostras foi obtido seguindo a norma TAPPI T211om-02.

A determinação de voláteis foi realizada aquecendo as amostras em atmosfera inerte até a temperatura de 950°C e mantendo essa temperatura por sete minutos. Após o período de

aquecimento as amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente e pesadas. O teor percentual de voláteis é dado pela Eq. (5.1), em que $massa_{mufla}$ se refere à massa da amostra após o processo de aquecimento, e $massa_{inicial}$ à massa da amostra no início do ensaio, após a determinação de umidade.

$$Voláteis\ \% = \frac{massa_{inicial} - massa_{mufla}}{massa_{inicial}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$T_{carb} = 100 - (T_{umid} + T_{cinza} + T_{vol}) \quad (5.2)$$

A determinação do teor de carbono fixo (T_{carb}) foi feita pela diferença dos resultados dos teores percentuais de umidade (T_{umid}), de cinzas (T_{cinza}) e de voláteis (T_{vol}), conforme Eq. (5.2). Todos os ensaios relativos à determinação da composição imediata foram realizados em duplicata, sendo o resultado final a média aritmética simples dos resultados parciais. Os ensaios foram realizados na PUCRS, no Instituto de Petróleo e Recursos Naturais - IPR.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados de composição imediata em base seca, que é a forma mais usualmente encontrada na literatura. Os valores de umidade também estão apresentados, para fins de comparação.

Tabela 5.2 - Composição imediata dos materiais

Biomassa	Carbono Fixo* [%]	Voláteis* [%]	Cinzas* [%]	Umidade [%]
Bagaço de cana	14,3	81,8	3,9	8,6
Palha de cana	17,2	78,5	4,4	12,2
Madeira de eucalipto	6,5	93,5	1,3	6,1
Casca de arroz	11,7	69,6	18,7	13,4
Ramos de macieira	9,3	88,7	1,9	10,1

* Valores em base seca

A Tabela 5.2 mostra que as composições imediatas do bagaço e da palha de cana-de-açúcar são bastante semelhantes, divergindo um pouco dos valores obtidos para a madeira de eucalipto e para os ramos de macieira. Este resultado é esperado, uma vez que o bagaço e a palha derivam de uma mesma espécie vegetal, o que tem grande correlação com a composição imediata. As composições imediatas obtidas para o bagaço e para a palha de cana foram equivalentes aos resultados encontrados por Braz (2014), por Farias (2012) e por Machado

(2016). Tanto a Tabela 5.2 quanto a Tabela 5.4 denotam o baixo teor de cinzas das biomassas, o que implica em um custo mais baixo com filtros e precipitadores de partículas no aproveitamento energético destas biomassas através de combustão. A exceção é a casca de arroz, que apresentou teor de cinzas de 18,7%.

5.3.2 Composição Elementar

A determinação dos teores percentuais de carbono ($C_{\%}$), nitrogênio ($N_{\%}$) e hidrogênio ($H_{\%}$) nas amostras foi realizada utilizando o método calorimétrico automatizado de Pregl-Dumas (HARRIS, 2012). Neste método as amostras foram queimadas em atmosfera de oxigênio na temperatura de 950 °C em um analisador elementar da marca Leco e modelo TruSpec não dispersivo, equipado com um detector infravermelho. A determinação do teor percentual de enxofre ($S_{\%}$) foi realizada em um analisador elementar de marca Leco e modelo SC-632, equipado com um detector infravermelho. O menor valor de teor de enxofre detectável neste equipamento é de 0,1%. Neste equipamento as amostras foram queimadas em atmosfera de oxigênio à temperatura de 1350 °C. A determinação do teor de oxigênio ($O_{\%}$) foi feita por diferença, conforme a Eq. (5.3). Todas as análises foram realizadas em duplicata no IPR da PUCRS.

$$O_{\%} = 100 - (C_{\%} + N_{\%} + H_{\%} + S_{\%}) \quad (5.3)$$

A Tabela 5.3 mostra que a composição elementar das cinco biomassas é equivalente. Além disso, fica evidente que o teor de enxofre nestas biomassas é próximo de zero, o que é muito positivo no contexto do aproveitamento energético destes materiais e da redução das emissões na geração de energia térmica ou elétrica.

Tabela 5.3 - Composição elementar dos materiais

Biomassa	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]
Bagaço de cana	46,4	6,3	0	0,1	46,8
Palha de cana	43,9	6,3	0,6	<0,1	48,3
Madeira de eucalipto	53,8	5,7	0	<0,1	40,6
Casca de arroz	42,5	4,9	1,3	0,1	51,2
Ramos de macieira	44,0	6,3	0,7	<0,1	49,1

5.3.3 Composição Química

A determinação dos teores de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas foi realizada de acordo com a norma TAPPI T222om-11. A determinação do teor de extrativos totais nas amostras baseou-se nas normas TAPPI T204om-88 e TAPPI T264om-88, através da extração dos compostos voláteis presentes na biomassa, utilizando solução álcool-tolueno na proporção 1:2, seguido por álcool isopropílico com pureza de 95% e água quente, nesta respectiva ordem. Os experimentos foram realizados em duplicata no Laboratório de Papel e Celulose da Universidade Federal de Viçosa.

A Tabela 5.4 apresenta a composição química das biomassas, revelando haver pequenas diferenças entre as composições dos materiais. A composição química do bagaço de cana foi próxima do resultado obtido por Santos et al. (2013). No entanto, Santos et al. (2013) encontraram teores de hemicelulose até 10% maiores nas amostras de palha de cana de outros estados (MG, SP, PR e MT), e teores de celulose até 8% maiores nestas mesmas amostras. Estas diferenças na composição química provavelmente estão relacionadas com as diferentes condições edafoclimáticas de cultivo dos vegetais. A casca de arroz apresentou teor de cinzas bastante superior às demais biomassas, o que é coerente com os resultados de composição imediata dos materiais.

Tabela 5.4 - Composição química dos materiais

Biomassa	Celulose [%]	Hemicelulose [%]	Lignina [%]	Cinzas [%]	Extrativos [%]
Bagaço de cana	41,3	28,1	21,9	3,6	6,4
Palha de cana	37,3	19,9	21,7	3,9	13,9
Madeira de eucalipto	44,8	23,3	27,3	1,3	3,5
Casca de arroz	30,6	20,8	26,8	9,9	11,9

5.3.4 Poder Calorífico

A medição do poder calorífico superior dos materiais foi realizada no LCVMAT, utilizando um calorímetro da marca IKA, modelo C200. A norma de referência para este ensaio foi a ISO 1928:2009. Os testes foram realizados em duplicata, e o valor final foi calculado por média aritmética simples. O instrumento utilizado tem resolução de 1 kJ e erro máximo de 0,1% do valor medido.

5.4 BANCADA DE FLUIDIZAÇÃO

Os testes de fluidização foram realizados em uma bancada apresentada na Figura 5.4. Os detalhes do projeto e da construção desta bancada podem ser obtidos em Genehr (2015).

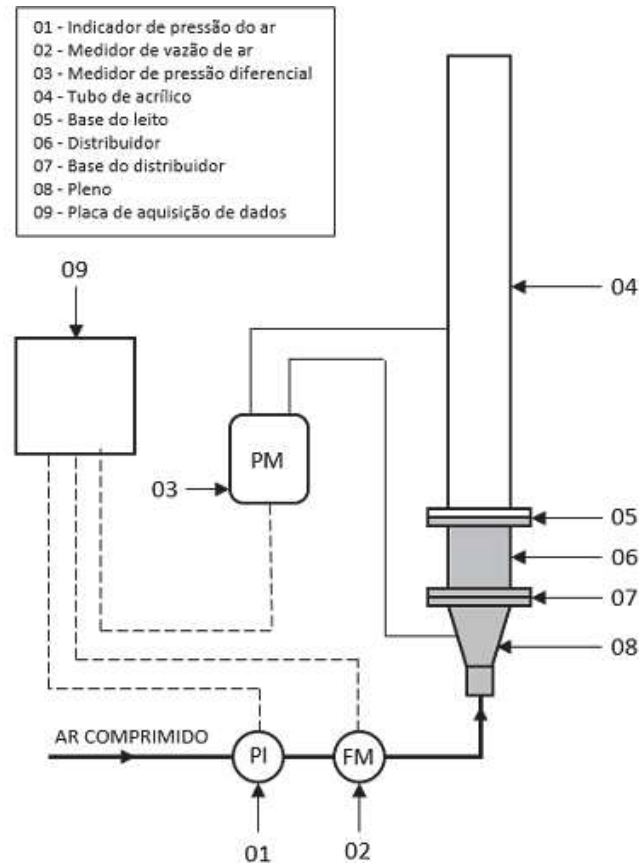


Figura 5.4 - Esquema da bancada de fluidização

Fonte: Genehr (2015).

A coluna de fluidização foi confeccionada a partir de um tubo cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 94 mm e parede de 3 mm de espessura. A coluna é bipartida para facilitar a montagem do leito, e a conexão entre os segmentos é do tipo flangeada. A altura total da coluna é de 1200 mm. A alimentação da bancada é feita com ar comprimido seco, através de um distribuidor.

O distribuidor do leito é constituído de um tubo cilíndrico de aço inox, com comprimento de 100 mm. O recheio do distribuidor é constituído de esferas de vidro, com diâmetro de aproximadamente 9 mm. A disposição destas esferas no distribuidor é aleatória. Abaixo do distribuidor se localiza o pleno, por onde é insuflado o ar para fluidização. A conexão entre o pleno e o distribuidor também é do tipo flangeada. Nas extremidades inferior

e superior do distribuidor foram instaladas telas metálicas, com abertura circular de aproximadamente 0,3 mm. A tela na posição 05 na Figura 5.4 tem por função sustentar o material adicionado no leito.

A partir da construção inicial, foram feitas melhorias na bancada no sentido de reduzir o tempo de configuração e de montagem do conjunto para a realização dos testes de fluidização. Para tanto, todos os sensores foram montados em uma placa, de forma que as conexões pneumáticas e elétricas entre os sensores e o módulo de aquisição de dados não precisassem ser refeitas a cada teste de fluidização.

Genehr (2015) citou ter enfrentado limitações na vazão de ar comprimido disponível no local original de instalação da bancada, no LCVMAT da UNISINOS. Essas limitações implicaram em restrições nos materiais e misturas que puderam ser testados em seu trabalho. Para contornar este problema, foi realizado um estudo de viabilidade de instalação da bancada em diferentes locais na UNISINOS. O local escolhido, o Laboratório de Pneumática do Departamento de Engenharia Mecânica, reuniu as condições de ambiente climatizado e isento de poeira, disponibilidade de ar comprimido com vazão de até 50 Nm³/h e alimentação elétrica com tensão de 220 V.

5.4.1 Medição da Vazão Volumétrica de Ar

A medição da vazão de ar comprimido injetada no leito foi realizada utilizando um instrumento da marca IFM, modelo SD6050. O equipamento possui uma faixa de medição de 0,2 a 75 Nm³/h, com precisão de $\pm 1,5\%$ e saída de sinal analógico de 4 a 20 mA. Para que a faixa de precisão especificada seja atendida, é importante atentar para a recomendação do fabricante quanto ao comprimento mínimo da seção reta de tubulação de ar à montante do instrumento.

5.4.1.1 Determinação da Velocidade do Ar

A determinação do valor médio da velocidade do ar normal à seção transversal da coluna de fluidização pode ser realizada em função da vazão volumétrica medida de ar, uma vez que a área da seção interna da coluna de fluidização é constante e conhecida.

O instrumento utilizado retorna os valores de vazão já corrigidos para as condições da CNTP, expressos na unidade de Nm³/h, o que elimina os efeitos de eventuais variações na temperatura ou pressão do fluido nos resultados de vazão. Como a velocidade do ar

geralmente é expressa em m/s, utiliza-se a Eq. (5.4) para a conversão das unidades. Na Eq. (5.4) U representa a velocidade média do ar na coluna de fluidização, em m/s, Q a vazão volumétrica medida de ar, em Nm³/h, e A indica a área interna da seção transversal da coluna, dada em m².

$$U = \frac{Q}{3600A} = \frac{Q}{24,9832} \quad (5.4)$$

5.4.2 Medição da Pressão Diferencial

A medição da pressão diferencial é empregada na determinação da queda de pressão ao longo do leito. As tomadas de pressão foram feitas na parte inferior do leito e após a coluna de material a ser fluidizado. O diâmetro dos furos nestas tomadas é de aproximadamente 1 mm.

A medição da pressão diferencial foi realizada com 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, e saída com sinal analógico de 4 a 20 mA.

5.4.3 Registro de Dados

A aquisição e registro dos dados experimentais foram realizados por um módulo de leitura e registro da marca NOVUS, modelo Fieldlogger. O equipamento possui oito entradas analógicas ou digitais, e suporta conexão USB para transferência dos dados para um computador. Os instrumentos de medição são conectados ao módulo através de cabos e alimentados com uma fonte estabilizada, com tensão de saída de 24 Vcc. Todos os dados são registrados ao mesmo tempo, com frequência de aquisição de 1 Hz.

5.4.4 Determinação da Queda de Pressão da Coluna e do Distribuidor

Quando se avalia a queda de pressão ao longo de um leito, é importante levar em consideração que uma parcela desta queda se dá em função da própria coluna de fluidização e do seu distribuidor. Assim, para que se possa avaliar a queda de pressão devida unicamente ao leito de partículas, é necessário realizar a determinação da queda de pressão a vázio da coluna. Essa determinação foi realizada em triplicata, conforme mostrado na Figura 5.5. A partir da média dos dados das três curvas de queda de pressão a vázio, obteve-se uma equação de

ajuste, Eq. (5.5), que foi utilizada para corrigir os dados de queda de pressão nos testes posteriores, e em que Δp se refere à queda de pressão corrigida e Δp_{medido} se refere ao valor medido de queda de pressão. O coeficiente R^2 de ajuste da equação obtida foi de 0,9925.

$$\Delta p = \Delta p_{medido} - (4,009 U^2 - 6,618 U + 2,992) \quad (5.5)$$

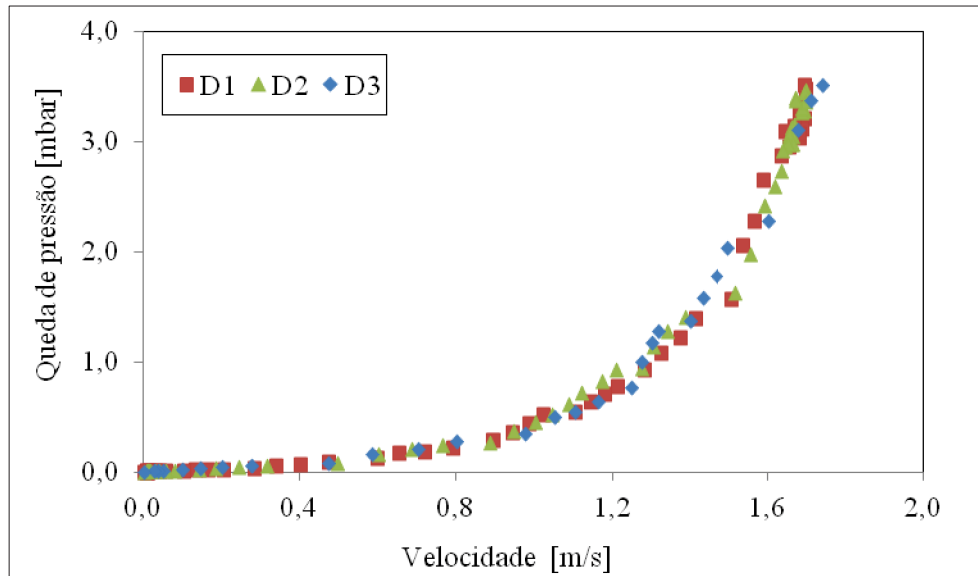


Figura 5.5 - Curvas de queda de pressão do conjunto distribuidor e coluna

5.5 CURVAS DE FLUIDIZAÇÃO

Neste trabalho foram realizados ensaios de fluidização de misturas binárias entre biomassas e areia, com frações de biomassa de 20%, 40%, 60% e 80% do volume total das misturas. As biomassas utilizadas foram bagaço e palha de cana-de-açúcar, madeira de eucalipto, casca de arroz e ramos de macieira. Os dados experimentais obtidos nestes ensaios foram as curvas de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, e o comportamento do leito ao longo das variações de velocidade do ar, identificando fenômenos como formação de clusters ou caminhos preferenciais, por exemplo.

5.5.1 Misturas de Biomassa e Inerte

As misturas de biomassas e inerte foram elaboradas de forma a manter a relação entre a altura inicial do leito H e o seu diâmetro interno D em um valor próximo do unitário. Essa

medida vai ao encontro ao que foi realizado por Genehr (2015) e Lourenço e Tannous (2015), com o objetivo de minimizar a formação de aglomerados. Portanto, o volume total das misturas em todos os testes foi aproximadamente o mesmo. Conhecendo este volume e as massas específicas aparentes dos materiais envolvidos, bem como as frações de biomassa em volume desejadas em cada mistura, pode-se determinar as massas de inerte e de cada biomassa para cada mistura, bem como as respectivas frações mássicas x_b de biomassa. Estes dados estão apresentados na Tabela 5.5 para o bagaço de cana, na Tabela 5.6 para a palha de cana, na Tabela 5.7 para a madeira de eucalipto, na Tabela 5.8 para a casca de arroz e na Tabela 5.9 para os ramos de macieira.

Tabela 5.5 - Composição das misturas de bagaço de cana e areia

Mistura	Fração de Biomassa em Volume [%]	Massas [g]			x_b [%]
		Areia	Bagaço de Cana	Total	
20BC	20	782,49	22,80	805,29	2,83
40BC	40	586,87	45,60	632,47	7,21
60BC	60	391,25	68,40	459,65	14,88
80BC	80	195,62	91,20	286,83	31,80

Tabela 5.6 - Composição das misturas de palha de cana e areia

Mistura	Fração de Biomassa em Volume [%]	Massas [g]			x_b [%]
		Areia	Palha de Cana	Total	
20PC	20	782,49	12,84	795,33	1,61
40PC	40	586,87	25,68	612,55	4,19
60PC	60	391,25	38,51	429,76	8,96
80PC	80	195,62	51,35	246,98	20,79

Tabela 5.7 - Composição das misturas de madeira de eucalipto e areia

Mistura	Fração de Biomassa em Volume [%]	Massas [g]			x_b [%]
		Areia	Eucalipto	Total	
20CE	20	782,49	32,58	815,07	4,00
40CE	40	586,87	65,16	652,03	9,99
60CE	60	391,25	97,73	488,98	19,99
80CE	80	195,62	130,31	325,93	39,98

Tabela 5.8 - Composição das misturas de casca de arroz e areia

Mistura	Fração de Biomassa em Volume [%]	Massas [g]			x_b [%]
		Areia	Casca de Arroz	Total	
20CA	20	782,49	35,53	818,02	4,34
40CA	40	586,87	71,05	657,92	10,80
60CA	60	391,25	106,58	497,83	21,41
80CA	80	195,62	142,11	337,73	42,08

Tabela 5.9 - Composição das misturas de ramos de macieira e areia

Mistura	Fração de Biomassa em Volume [%]	Massas [g]			x_b [%]
		Areia	Ramos de Macieira	Total	
20RM	20	782,49	61,12	843,61	7,25
40RM	40	586,87	122,25	709,12	17,24
60RM	60	391,25	183,37	574,62	31,91
80RM	80	195,62	244,50	440,12	55,55

5.5.2 Determinação das Curvas de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar

Para a determinação das curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, as amostras foram colocadas na coluna e sujeitas à máxima vazão de ar disponível, em torno de 50 Nm³/h, para mistura e homogeneização do leito. Este procedimento evita que os testes já sejam iniciados com alguma segregação no leito, por exemplo. Cada processo de mistura foi realizado por aproximadamente 10s, e então o escoamento de ar foi interrompido subitamente, através de uma válvula de fecho rápido no suprimento de ar comprimido. Após a mistura, o leito precisa ser assentado através de vibração manual na bancada, para que os testes de fluidização não iniciem com o leito já expandido.

Cada teste de fluidização inicia com o início da coleta de dados no Fieldlogger e com a posterior abertura lenta da válvula de fornecimento de ar comprimido, do tipo globo. O aumento da vazão de ar deve ser suficientemente gradual, para que a quantidade de pontos registrados pelo sistema de coleta seja adequada, permitindo a obtenção de uma curva apropriada. A vazão de ar foi aumentada até o máximo disponível na maioria dos testes, com exceção daqueles em que, para vazões mais altas de ar, se verificou o transporte pneumático das partículas.

Com a bancada em sua vazão máxima de ar, inicia-se a defluidização do leito, com a redução gradual da vazão de ar comprimido através do fechamento da válvula globo, até a interrupção completa do fluxo de ar. Ao longo de todos os testes foram observados e anotados o comportamento do leito nas mudanças de regime de fluidização, e as respectivas vazões de ar. Esse procedimento de mistura, aumento gradual de vazão e posterior redução gradual de vazão foi realizado em triplicata para cada mistura avaliada.

5.5.3 Determinação das Velocidades Características de Fluidização

Com a obtenção das curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar, é possível determinar as velocidades características de fluidização para cada mistura. A Figura 5.6 ilustra as curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar obtidas para a mistura 40CE nas três repetições para o ensaio de fluidização e defluidização. As velocidades determinadas são as seguintes:

- a) velocidade inicial de fluidização - U_{if} : corresponde ao início do movimento do leito. Nas misturas de biomassas e inertes, esse movimento inicial é dado predominantemente por partículas inertes;
- b) velocidade mínima de fluidização - U_{mf} : conforme Wen e Yu (1966) e Lourenço e Tannous (2015), pode ser determinada pela intersecção entre uma reta ao longo da região de leito fixo com a linha de queda de pressão constante após a fluidização, conforme mostrado na Figura 5.6;
- c) velocidade de segregação - U_s : corresponde à formação de uma zona totalmente defluidizada na camada superior ou inferior do leito. Não ocorre para todas as misturas;
- d) velocidade de fluidização completa da mistura - U_{cf} : definida como a velocidade a partir da qual a queda de pressão ao longo do leito se torna constante, correspondendo à suspensão completa das partículas no leito.

Conforme Lourenço e Tannous (2015), as velocidades características de fluidização foram obtidas a partir das curvas de defluidização, por usualmente serem mais semelhantes entre si. As curvas de fluidização são muito suscetíveis ao arranjo inicial do leito, apresentando com frequência variabilidade de comportamento para um mesmo material ou mistura.

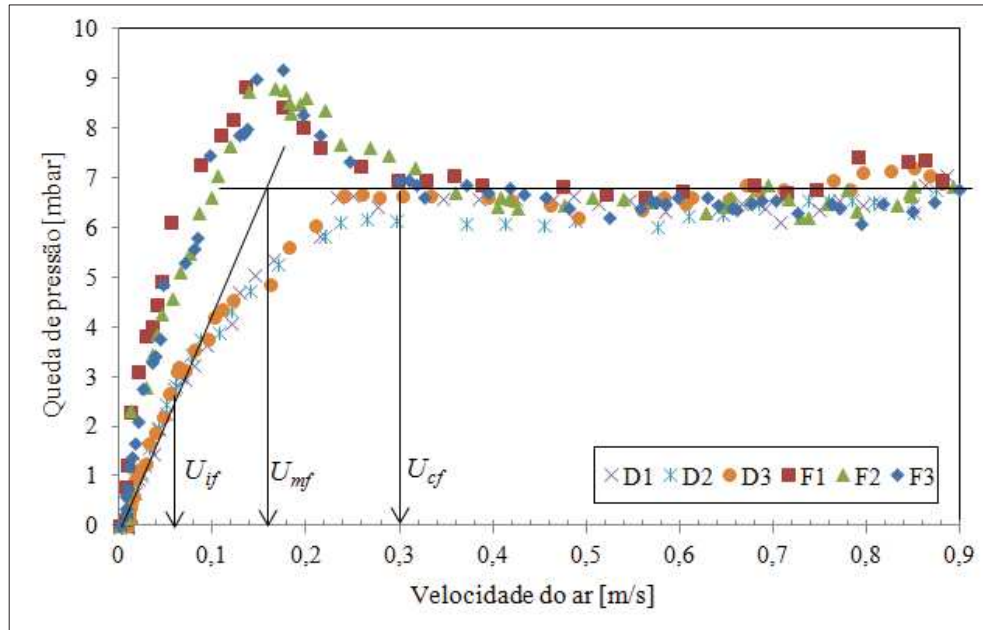


Figura 5.6 - Curvas de defluidização para a mistura 40CE

5.6 OUTROS DADOS DE FLUIDIZAÇÃO

Além dos resultados de fluidização obtidos para bagaço e palha de cana-de-açúcar, madeira de eucalipto, casca de arroz e ramos de macieira, com teores de biomassa nas misturas binárias de 20%, 40%, 60% e 80% em volume, são citados neste trabalho os resultados obtidos nos testes de fluidização realizados em conjunto com um grupo de pesquisa da UERGS - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Neste contexto, foram realizadas fluidizações com misturas binárias de areia e bagaço de cana, madeira de eucalipto, ramos de macieira, mesocarpo de coco e resíduos (folhas e caules) de nabo forrageiro. Os teores de biomassa nas misturas utilizados nestes testes foram de 10%, 30%, 50%, 70% e 90% em volume. A areia utilizada nestes testes realizados em conjunto com o grupo da UERGS foi chamada de areia 2, enquanto a areia utilizada neste trabalho foi chamada de areia 1. As partículas da areia 2 apresentaram um diâmetro médio de Sauter de 232 μm , enquanto que para a areia 1 esta propriedade foi de 363 μm .

5.7 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A regressão linear múltipla foi empregada para identificar e avaliar correlações entre propriedades químicas e físicas nas velocidades características de fluidização na fluidização

de biomassas. A aplicação do método e a análise dos seus requisitos foram realizadas utilizando o software IBM SPSS 22.

As variáveis dependentes nas regressões foram a velocidade mínima de fluidização - U_{mf} e a velocidade de fluidização completa - U_{cf} . As variáveis independentes utilizadas foram a fração mássica de biomassa nas misturas, as massas específicas real e aparente das misturas, o diâmetro médio de Sauter e o quadrado desse diâmetro, o diâmetro médio de Feret e o quadrado desse diâmetro, o diâmetro médio de Sauter corrigido pela esfericidade e o quadrado dessa medida, o ângulo de repouso das misturas e os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas das misturas.

A seleção de variáveis relevantes na regressão foi realizada no SPSS utilizando o critério *stepwise*. Neste critério, o software inicia a regressão utilizando a variável independente que apresentar o maior coeficiente de correlação de Pearson. A partir daí o software avalia quais variáveis independentes que, se adicionadas à regressão, representariam o maior ganho no coeficiente de determinação múltipla R^2 . As variáveis independentes sugeridas são adicionadas até que o aumento de R^2 não seja mais significativo.

A verificação dos requisitos necessários para a correta aplicação da regressão linear múltipla também foi realizada no SPSS. A confirmação da existência de relação linear entre a variável dependente e as variáveis independentes foi realizada através de uma matriz de gráficos de dispersão de pontos.

A independência nas observações é intrínseca à forma de coleta de dados utilizada, com testes individuais para cada valor obtido. A ausência de multicolinearidade entre as variáveis independentes é automaticamente realizada pelo SPSS durante a regressão linear múltipla. As variáveis com maior coeficiente de correlação entre si são, portanto, excluídas da análise. A homocedasticidade (homogeneidade na variância) dos resultados foi verificada através de um gráfico dos erros da correlação (resíduos) em função dos valores previstos normalizados. A normalidade de erros, por sua vez, foi verificada através de um histograma dos resíduos padronizados, obtidos na regressão linear múltipla.

6 FLUIDIZATION STUDY OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASSES AND ITS PHYSICAL, CHEMICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS

Abstract. Fluid dynamics researches provide valuable information for design and operation of fluidized bed systems. However, fluidization mathematical modeling, even for homogeneous particles, is a complex subject: it involves modeling gas flow, solids flow and the interaction between them. Correlations used to determine fluidization design parameters, such as characteristic velocities, commonly are based on bed porosity and particles true density, mean diameter and sphericity, which are properties with difficult obtainment for particles with the typical morphology of lignocellulosic biomasses. Some authors have proposed empirical correlations for characteristic velocities, with adjustment coefficients based on experimental data, but they generally show limited applicability. The objective of the present work was to investigate the fluidization behavior of binary mixtures of different lignocellulosic biomasses with an inert material: characteristic fluidization velocities obtained experimentally were compared with predictions of correlations from literature. Biomasses evaluated were sugarcane straw and bagasse, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches, in binary mixtures with sand in the following proportions: 20, 40, 60 and 80% of biomass volume fraction. Materials were characterized by their mean particle size (Sauter and Feret methods), true density, loose and tapped bulk densities, chemical, proximate and elemental compositions, higher heating value, repose angle, sphericity and aspect ratio. A bench scale reactor, with 94 mm internal diameter, was used to fluidize biomass and sand mixtures. Measured variables were air flow rate and pressure drop along the bed. The characterization showed that biomasses present similar elemental composition, and small differences in chemical and proximate compositions. True densities varied between 1002 kg/m³ for straw and 2587 kg/m³ for sand, and loose bulk densities varied between 98 kg/m³ for straw and 1499 kg/m³ for sand. Particles mean Sauter diameter ranged from 363 μm for sand to 931 μm for straw, while Feret mean diameter ranged from 378 μm for sand to 2718 μm for straw. Fluidization tests showed minimum fluidization velocities U_{mf} between 0.11 and 0.38 m/s, and complete fluidization velocities U_{cf} between 0.18 and 0.82 m/s for mixtures. Biomass and sand mixtures fluidized well in proportions up to 60% in volume of biomass. For proportions above this limit, there was formation of preferential channels and occurrence of agglomerations in bed. Tested empirical correlations were unable to predict U_{mf} and U_{cf} in any situation, presenting great dispersion at the results and relative errors higher than 60%.

Key-words: Fluidization. Biomass and sand mixtures. Renewable energy sources. Empirical correlations.

6.1 INTRODUCTION

Analyzing the global energy demand growth rate over the last decades, it is clear that energy consumption has grown at an unsustainable pace, since much of the demand has been met by fossil fuel usage (EIA, Energy Information Administration, 2016). And as known, fossil fuels induce great impact on air pollution and global warming. Therefore, it is urgent to encourage and improve the use of renewable energy sources, among which biomass emerges as one of the most relevant and promising, especially in Brazilian scenario.

In Brazil, among the several biomasses available, the most important are those from agricultural and industrial waste. According to BEN (National Energy Balance, 2016), the biomass share in the electric energy domestic supply is about 7.3%, and in the total primary energy supply this participation is approximately 27.9% (compared to 39.4% share of oil and 13.5% of natural gas) (BEN, 2016). These values denote the biomass relevance in Brazilian energy scenario, and a great potential for increasing these participations.

In the context of the energy utilization, the main advantages in lignocellulosic biomasses usage are (BRAZ, 2014; LOURENÇO, 2012):

- a) Neutral emission of CO₂, due to the carbon cycle and the photosynthetic growth of plants;
- b) Low emissions of SO_x and NO_x in thermal conversions, due to low sulfur and nitrogen contents usually found in lignocellulosic biomass;
- c) Social and environmental appeal, through use of wastes (which enhances economic viability) and incentive to generate jobs and economic activity in rural areas.

Lignocellulosic biomass particles usually present varied and particular physical and morphological characteristics, so that many of mathematical models developed for fluidization of spherical or homogeneous particles are not applicable. The use of classical fluidization models often implies in significant errors at the prediction of parameters of interest for biomass fluidization, which is evidenced in several studies, such as those of Fotovat, Chaouki and Bergthorson (2013), Miao et al. (2011) and Fotovat et al. (2015).

Models used to predict biomass mixtures fluidization behavior generally are based on physical characterization of the particles (mean particles diameter, true and bulk densities and sphericity). However, lignocellulosic biomass particulates generally present complex morphologies, very different from the regular and almost spherical shape from inert particles, such as sand and alumina, as evidenced by Lourenço and Tannous (2015). This prevents the usual characterization methods from providing good results when applied to biomasses. Some studies have shown that fluid dynamics behavior of biomass particulates is strongly affected by morphology and moisture content, as shown by Lourenço and Tannous (2015) and by Fotovat, Chaouki and Bergthorson (2013). In this context, the objectives of this paper are the following:

- perform a physical and physicochemical characterization of biomasses and inert materials;
- determine characteristic fluidization velocities for biomass and inert binary mixtures;

- compare experimental results with those calculated by correlations available in the literature, for different biomasses.

The increase of renewable energy share in global energy matrix depends on the economic viability of its employment, which, in turn, depends on the understanding of the potential of use of certain biomasses in the applications of interest, and on studies such as the fluid dynamics behavior of these materials. Therefore, it is necessary to investigate the fluidization of biomass and sand binary mixtures, such as characteristic velocities and bed operating regime, as well as other biomass characteristics that show relevance on the fluidization behavior prediction.

6.2 METHODOLOGY

6.2.1 Preparation and Characterization of Samples

All analyzed biomasses were received *in natura*, and to allow their fluidization and characterization, were dried in a kiln and ground. Sugarcane bagasse and straw came from Pelotas/RS (31°40'23"S 52°19'27"W), and were supplied by EMBRAPA. Eucalyptus wood was originated from Guaíba/RS (30°10'32"S 51°21'01"W), and was supplied by Celulose Riograndense company. Apple tree branches came from Vacaria/RS (28°25'46"S 51°00'01"W), and rice husk came from Cachoeira do Sul/RS (30°10'16"S 52°55'14"W).

Sand used in the fluidization tests was a commercial material, available at hardware stores. Sand was sieved according to the ISO 3310-1 standard. In order to guarantee a homogeneous material, only the material from sieves with the largest retained mass fraction was used, between mesh 40 and 50.

Samples were dried at 105 °C for 8 hours, and the type of mill used was of knives, model Seibt MGHS 270A. True densities of samples were obtained using a helium pycnometer, model Micromeritics AccuPyc II 1340. This equipment has an accuracy of $\pm 0.02\%$. Loose and tapped bulk densities were determined according to the ASTM D7481 standard, using a cylinder of known volume and a precision digital scale, with resolution of 0.002 g.

Sauter mean diameter of samples were determined by means of a particle size analysis using a set of sieves with a standard aperture, following ISO 3310-1. Feret mean diameter, aspect ratio and sphericity were determined using ImageJ software, using the "Analyze

Particles" function. Twenty images were analyzed for each biomass, in a total of approximately 600 particles for each material. Images were obtained with a 62x magnification on a Starret AV300+ CNC measuring equipment. Particles were selected through the software "Threshold" function, and Feret diameter, aspect ratio and sphericity were determined using the "Shape descriptors" function.

HHV of materials were evaluated using an IKA C200 calorimeter, according to the ISO 1928:2009 standard. The tests were performed in duplicate, and the final result was obtained by simple mean. The instrument used has a resolution of 1 kJ and a maximum error of 0.1% of the measured value.

Repose angles were determined using a 100 mL funnel, with an internal inlet diameter of 95 mm and an outlet diameter of 9 mm. The funnel was positioned on a rigid and flat surface, and the funnel outlet was fixed at 100 mm from the surface. Samples flowed gradually through the funnel, forming a characteristic stack on the flat surface. Repose angle was determined using ImageJ software in two positions for each stack, and tests were performed in duplicate. Repose angle final result was the simple mean of these four measurements.

6.2.2 Mixtures

To perform the fluidization tests with binary mixtures between sand and sugarcane bagasse, sugarcane straw, eucalyptus wood, apple tree branches and rice husk, samples were prepared with biomass fractions of 20%, 40%, 60% and 80% of the total volume of the mixture.

Mixtures were made so as to maintain the relationship between the initial bed height and its inner diameter at a value close to unitary. This premise is in line with what was done by Genehr (2015) and Tannous and Lourenço (2015), in order to minimize the probability of cluster formation in bed. Therefore, the total volume of each sample in all tests was approximately the same. Knowing this volume and the materials bulk densities, as well as the desired biomass volume fractions in each mixture, one can determine the corresponding biomass and sand masses to prepare the samples.

6.2.3 Equipment Setup

Fluidization tests were performed on a workbench detailed in Figure 6.1. The fluidization column was made from a cylindrical acrylic tube with internal diameter of 94 mm and 3 mm of wall thickness. Air feed was provided by dry compressed air. The variables measured in this workbench were air flow rate and pressure drop along the bed.

Measurement of air flow rate through the bed was performed using an IFM SD6050 instrument. This equipment has a measurement range of 0 to 75 Nm³/h, with an accuracy of 1.5% and a 4 to 20 mA analog output. Differential pressure measurement was used to determine the pressure drop across the bed. The pressure ports were made at the bed bottom and after the column of material to be fluidized. Differential pressure was measured with a NOVUS HUBA 699 instrument, with measuring range from 0 to 25 mbar and a 4 to 20 mA analog output. Acquisition and recording of experimental data were performed by a NOVUS Fieldlogger module. This device has eight analog or digital inputs and supports USB connection for transferring data to a computer. All data were recorded simultaneously, with acquisition frequency of 1 Hz.

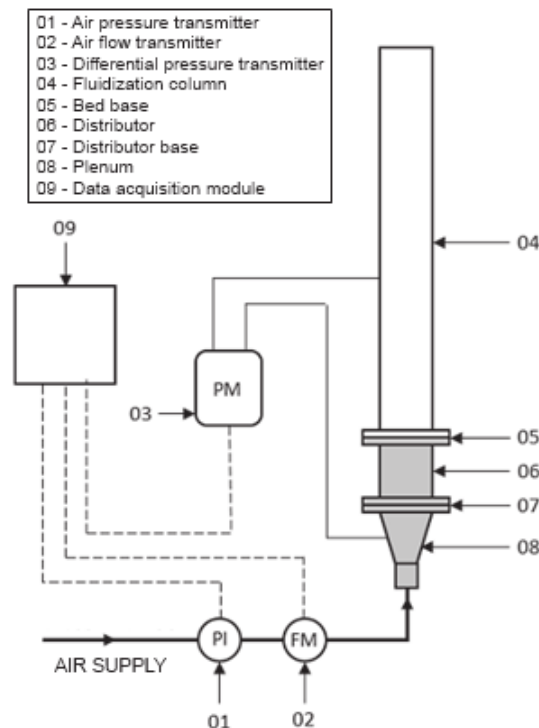


Figure 6.1 - Fluidization workbench scheme

6.2.4 Fluidization Procedures

For the determination of pressure drop as a function of superficial gas velocity graphs, samples were placed in the fluidization column and subjected to the maximum available air flow, of about 50 Nm³/h, for bed mixing and homogenization. This procedure prevents initial bed segregation during the tests. Each fluidization test begins with the slow opening of air supply valve. When maximum air flow is reached, the bed defluidization begins, with gradual reduction of air flow, until its complete interruption is reached. Through all tests the bed behavior, the fluidization regime changes and the respective air flow rates were observed and recorded. The procedure of mixing, gradual flow increase and subsequent gradual flow reduction was done in triplicate for each evaluated mixture.

6.2.5 Determination of Characteristic Fluidization Velocities

By obtaining graphs of pressure drop as a function of superficial gas velocity, it is possible to determine the experimental characteristic fluidization velocities for each mixture, as follows:

- a) Initial fluidization velocity - U_{if} : corresponds to the beginning of bed movement. In binary mixtures of biomass and sand, this initial movement is predominantly given by minor sand particles;
- b) Minimum fluidization velocity - U_{mf} : according to Wen and Yu (1966) and Tannous and Lourenço (2015), can be determined by the intersection between a line along the fixed bed region and the constant pressure drop line after fluidization;
- c) Complete fluidization velocity - U_{cf} : defined as the one from which bed pressure drop become constant, corresponding to particles complete suspension.

According to Tannous and Lourenço (2015) and Paudel and Feng (2013), several authors have tried to establish empirical models for fluidization processes. Most of these published studies used homogeneous particle correlations adapted for binary mixtures, using calculated properties such as effective diameter, sphericity, effective true density and bed porosity to determine theoretical characteristic fluidization velocities. Some authors have proposed more suitable correlations for mixtures, derived according to the materials properties and mass fractions and bed characteristics (CHIBA et al., 1979; Mourad et al.,

1984, see TANNOUS and LOURENÇO, 2015). These correlations often use dimensionless numbers, such as Reynolds and Archimedes.

In the case of mixtures containing biomass, generally the existing correlations have limited application to the conditions and plant species used by the authors. According to Tannous and Lourenço (2015) and Paudel and Feng (2013), this is mainly due to the dispersion of available experimental data, caused by the diversity of existing experimental conditions, such as different biomass species, biomass mass fractions in mixtures and different granulometry.

Regarding the theoretical determination of characteristic velocities, the minimum fluidization velocity for inert particles can be determined by the drag force method, using the relation between Reynolds and Archimedes numbers, given by Eq. (6.1).

$$Ar = \frac{1,75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150 (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} (Re_{mf}) \quad (6.1)$$

$$Re_{mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (6.2)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (6.3)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_p} \quad (6.4)$$

In Eq. (6.1), Ar represents Archimedes number, given by Eq. (6.3), ϕ_s represents particles sphericity, Re_{mf} represents Reynolds number at the minimum fluidization velocity, given by Eq. (6.2) and ε represents bed porosity at the minimum fluidization condition, given in its generic form by Eq. (6.4).

In Eq. (6.2), d_p represents mean particle diameter, U_{mf} represents minimum fluidization velocity, ρ_g the fluid true density and μ_g its viscosity. In Eq. (6.4), ρ_{ap} represents particles bulk density and ρ_p their true density.

Eq. (6.1) requires the determination of sphericity and bed porosity at minimum fluidization condition. Wen and Yu (1966) proposed a simplified form for this equation, which avoids the use of sphericity and bed porosity. Instead, two constants, K_1 and K_2 , are used and adjusted as a function of experimental fluidization data. According to Kunii and

Levenspiel (1991), K_1 and K_2 remain approximately constant for different types of particles in a wide Reynolds number range. Thus, considering the proposed equations, Reynolds number can be rewritten as Eq. (6.5).

When one studies the fluidization of mixtures, it is important to use physical properties that describe the whole set of particles present in bed. Thus, the values of the effective mixture true density, given by Eq. (6.6), and the mean effective particle size of the mixture, given by Eq. (6.7), were used.

$$Re = \left(K_1^2 + K_2 Ar \right)^{\frac{1}{2}} - K_1 \quad (6.5)$$

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} \quad (6.6)$$

$$d_m = d_1 d_2 \left(\frac{x_1 \rho_2 + x_2 \rho_1}{x_1 \rho_2 d_2 + x_2 \rho_1 d_1} \right) \quad (6.7)$$

$$Ar_m = \frac{d_m^3 \rho_g (\rho_m - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (6.8)$$

In both Eq. (6.6) and Eq. (6.7), x_1 and x_2 represent the mass fractions of each component of the mixture, and ρ_1 and ρ_2 their respective mass densities. In Eq. (6.7), d_1 and d_2 represent the mean particle sizes of each component of the mixture.

With this calculation of effective average properties, the mixture is treated as a new single component, and the Archimedes number can be calculated as a function of effective particle size and effective true density of the mixture, according to Eq. (6.8).

As the mass fraction of biomass x_b in the mixture is a parameter of great influence on fluidization behavior, Paudel and Feng (2013) proposed an equation for U_{mf} prediction that takes into account this information, maintaining the same structure and concept of Eq. (6.5). The result is expressed as Eq. (6.9). Similarly, Lourenço and Tannous (2015) developed an equation for U_{cf} prediction, expressed as Eq. (6.10).

$$Re_{mf} = \left\{ 30,28^2 + [0,046(1 - x_b) + 0,108x_b] Ar_m \right\}^{0,5} - 30,28 \quad (6.9)$$

$$Re_{cf} = 0,0123 Ar_m^{0,8086} \quad (6.10)$$

6.3 RESULTS AND DISCUSSION

6.3.1 Physical Characterization of Materials

Results for physical characterization of materials are presented at Table 6.1, which also presents the variation range of these results, relative to one standard deviation. Table 6.1 shows that biomass true densities were close to each other, but much smaller than the result for sand. This difference was much more significant in loose bulk density, whose value for sand was between 3 and 16 times higher than for biomasses. And this was reflected in the initial bed porosity, which was much smaller for sand, since its ratio between bulk and true densities is significantly higher than the same ratio for any biomass. True densities found for sugarcane bagasse and rice husk were close to the values obtained by Farias (2012). Loose and tapped bulk densities for eucalyptus wood were corroborated by results from Lourenço (2012). Table 6.1 also shows that, when Feret mean diameter is considered, all biomass particles were part of group D from Geldart classification, while sand was part of group B.

Table 6.1 - Results of physical characterization for sand and biomasses

Parameter	Sand	Sugarcane bagasse	Sugarcane straw	Eucalyptus wood	Apple tree branches	Rice husk
True density [g/cm ³]	2.5870 ±0.0015	1.1646 ±0.0013	1.0018 ±0.0050	1.3272 ±0.0018	1.3781 ±0.0016	1.3746 ±0.0021
Loose bulk density [g/cm ³]	1.499 ±0.028	0.175 ±0.006	0.098 ±0.004	0.250 ±0.008	0.469 ±0.012	0.272 ±0.008
Tapped bulk density [g/cm ³]	2.102 ±0.042	0.226 ±0.007	0.155 ±0.005	0.335 ±0.010	0.517 ±0.015	0.305 ±0.009
Initial bed porosity [%]	42.0	85.0	90.2	81.2	66.0	80.2
Sauter mean diameter [μm]	363.1 ±7.3	840.6 ±39.9	931.4 ±49.4	885.9 ±44.4	507.7 ±21.5	515.8 ±22.5
Feret mean diameter [μm]	378.0 ±17.8	2051.0 ±61.5	2718.1 ±81.8	1993.0 ±49.8	1956.0 ±46.8	1825.3 ±33.2
Sphericity [-]	0.73 ±0.04	0.33 ±0.02	0.31 ±0.03	0.26 ±0.02	0.32 ±0.02	0.36 ±0.02
Aspect ratio [-]	0.67 ±0.03	0.24 ±0.03	0.24 ±0.02	0.23 ±0.02	0.34 ±0.03	0.31 ±0.02
Repose angle [°]	33.8 ±0.7	54.5 ±1.6	59.4 ±1.9	64.0 ±2.3	42.7 ±1.3	46.9 ±0.9

The differences in loose bulk densities for the evaluated materials are an important result, as this is a property that is known to affect fluidization behavior. Bulk density is a

property that brings together several relevant factors to fluidization: it is related to true density and to bed porosity, which, in turn, depends on the morphology of the particles and on the interaction between them. The analysis of tapped bulk density showed equivalent mass increase in the compaction process for all materials, with values ranging from 30 to 40%, similar to results from Farias (2012).

Although all biomass underwent exactly the same grinding processes, the particles mean diameters by Sauter method presented significant differences. Sand particles mean diameter was much smaller than that of biomasses, which is a characteristic of great relevance in fluidization.

Particle size analysis according to the Feret mean diameter resulted in particle sizes much higher than those predicted by the Sauter method. The tendency of Sauter method to underestimate sizes of irregular particle is known and well described, as can be seen in Tannous et al. (2013), Olatunde et al. (2016) and Rezaei et al. (2016). It is interesting to note, however, that the size ranking of biomasses is the same by Sauter method or Feret method. This means that Sauter method underestimated the sizes of all biomasses analyzed in a similar way. For sand, both methods resulted in similar values. This result is awaited, since sand particles sphericity is much higher than those of biomass. By definition, for particles with unit sphericity, both methods should obtain equal mean particle size values.

Sphericity of analyzed biomasses was equivalent, of about 0.3, ranging from 0.26 for eucalyptus wood to 0.36 for rice husk. Aspect ratio results were also similar for the biomasses analyzed, ranging from 0.23 for eucalyptus wood to 0.34 for apple tree branches. These values are in agreement with what was verified by Tannous et al. (2013), Miao et al. (2011) and Rezaei et al. (2016), who evaluated similar biomasses.

Repose angle, like bulk density, is a parameter that unifies several properties: this angle depends on particles morphology, on the degree of cohesion between them and their bulk and true densities. It is interesting to note that results for repose angle do not seem to have direct correlation with the particles size, as shown at Table 6.1. The lowest repose angle was found for sand, of 33.8°, and the highest for eucalyptus wood, of 64.0°.

6.3.2 Physicochemical Characterization of Materials

Part of physicochemical characterization of materials was performed at the Petroleum and Natural Resources Institute (IPR) of PUCRS and at the Pulp and Paper Laboratory of Federal University of Viçosa/MG, and its results are presented in item 5.3. In these

laboratories the biomasses composition were determined, and proximate and elemental analyses were realized.

Table 6.2 presents chemical composition and HHV results for analyzed biomasses. Chemical composition and HHV values found for sugarcane bagasse are similar to the results from Braz (2014), and to the ones from Pécora et al. (2014). Results from Carvalho (2012) corroborate the composition results obtained for sugarcane bagasse and straw, and results from Lourenço (2012) corroborate the composition results obtained for *eucalyptus* wood.

HHV values found by Machado (2016) for sugarcane bagasse of 18.7 MJ/kg and for sugarcane straw of 18.3 MJ/kg were higher than those verified in this work, probably due to inherent variations in biomass harvesting, transport and storage processes. Results from Raye et al. (2016) corroborate the HHV values found for rice husk, while Braz (2014) found a value of 15.4 MJ/kg for this material.

Table 6.2 - Results of physicochemical characterization for sand and biomasses

Biomass	Cellulose [%]	Hemicellulose [%]	Lignin [%]	Ashes [%]	Extractives [%]	HHV [MJ/kg]
Sugarcane bagasse	41.3	28.1	21.9	3.6	6.4	17.140
Sugarcane straw	37.3	19.9	21.7	3.9	1.9	17.372
Eucalyptus wood	44.8	23.3	27.3	1.3	3.5	18.654
Rice husk	30.6	20.8	26.8	9.9	11.9	16.700

6.3.3 Bed Pressure Drop as a Function of Superficial Gas Velocity

Evolution of bed pressure drop as a function of superficial gas velocity were obtained for each mixture and for pure sand. These graphs were obtained for fluidization (increasing gas velocity) and for defluidization (decreasing gas velocity). Figure 6.2 shows the fluidization and defluidization graphs obtained for the 20PC mixture.

Figure 6.2 shows that pressure drop for a given superficial gas velocity in fluidization regime may be different than in defluidization. This difference is due to bed expansion during fluidization, which increases the interstitial space between particles. This phenomenon occurs up to the moment when the bed passes to complete fluidization regime. In this condition, pressure drop behavior in fluidization and defluidization are very similar. Figure 6.2 shows that there is a characteristic velocity that delimits this regime change: the complete fluidization velocity, U_{cf} . These fluidization and defluidization behaviors are in line with what

was verified by Cui and Grace (2007), Genehr (2015), Paudel and Feng (2013) and Lourenço and Tannous (2015).

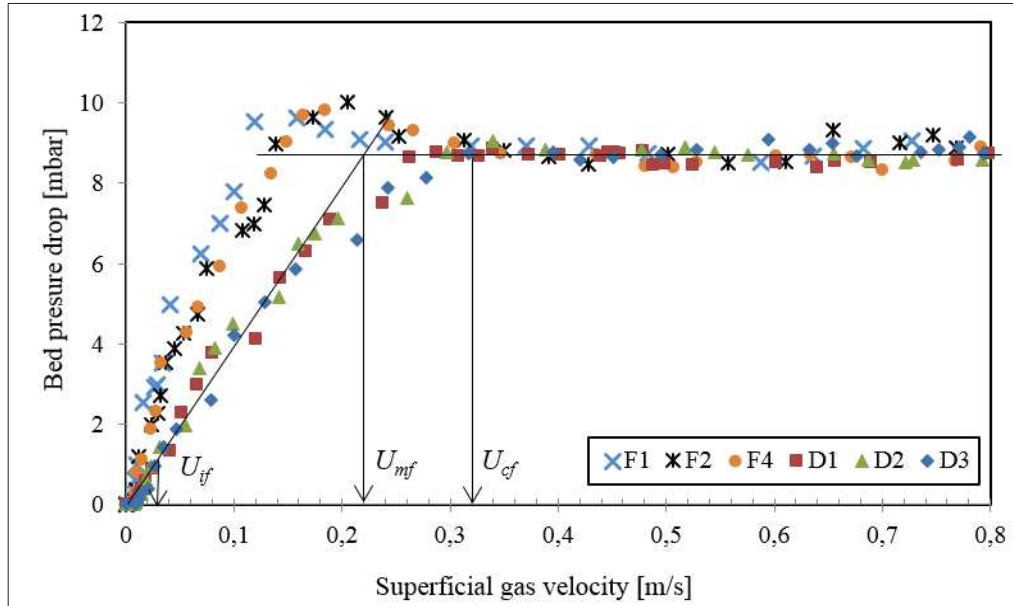


Figure 6.2 - Fluidization and defluidization evolution for 20SS mixture

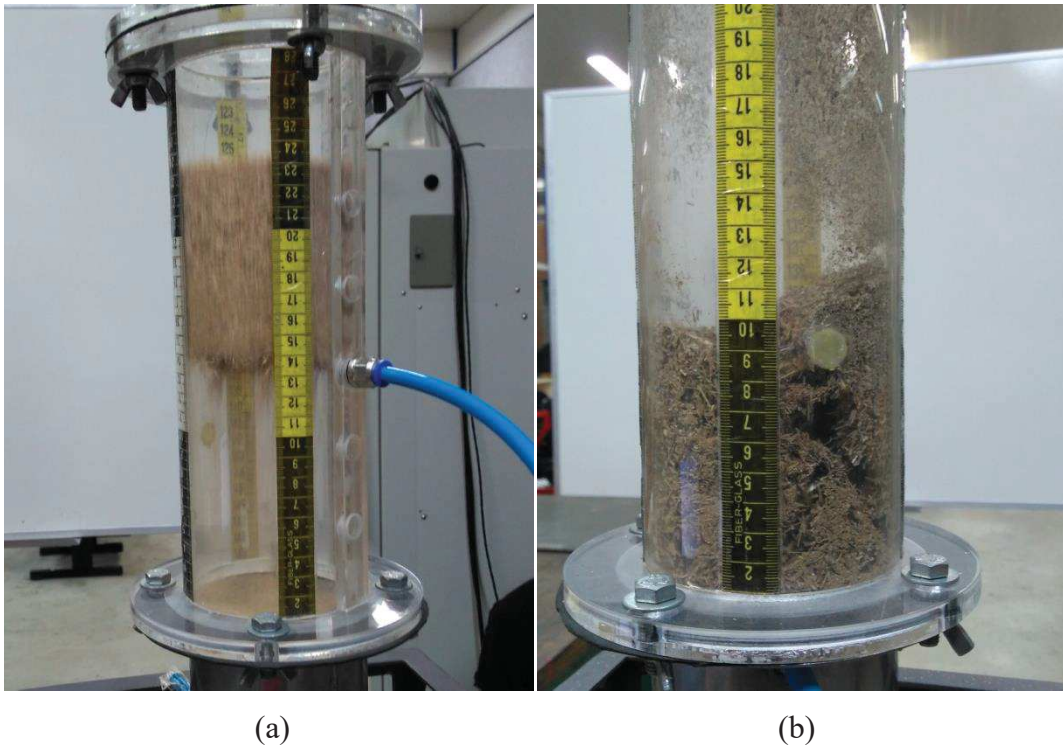


Figure 6.3 - Clusters and preferential channels formation in fluidization

For some mixtures, it was not possible to determine the graphs of bed pressure drop as a function of superficial gas velocity, due to intense formation of bed preferential channels or

to the occurrence of biomass agglomerates or clusters. The occurrence of these phenomena always took place in mixtures with high biomass content. Figure 6.3(a) shows the occurrence of clusters with bed diameter in 80EW mixture, completely ceasing the fluidization. Figure 6.3(b) shows the formation of preferential channels in 80SS mixture, which remained stable even after air supply interruption. In both cases, the graphs determination was not possible.

In 80SB mixture tests, there were also preferential channels, but fluidization was still possible, probably due to sugarcane bagasse smaller particle size, its greater bulk density and its typically less angular particle shape than those of straw. Sand and rice husk mixtures and sand and apple tree branches mixtures presented a less problematic fluidization behavior: for these biomasses it was possible to determine the fluidization graphs for all mixtures.

6.3.4 Experimental Characteristic Fluidization Velocities

Characteristic fluidization velocities were determined from graphs obtained from bed pressure drop as a function of superficial gas velocity, according to Figura 2.3. Experimental U_{if} , U_{mf} and U_{cf} results are presented at Table 6.3. As none of materials or mixtures analyzed showed segregation during fluidization tests, the U_s values were not determined.

Table 6.3 shows that U_{mf} and U_{cf} tend to increase as the mixture biomass content increases. This behavior is expected, since bed porosity increases with the increase of biomass content in each mixture. This increased porosity means a larger interstitial space between particles, requiring larger air flow to overcome the weight of these particles, in order to allow their fluidization.

The absence of the characteristic velocities for 80SS and 80EW mixtures was due to the impossibility of fluidization, as shown in Figure 6.3(a) and Figure 6.3(b). For sand, as it is a homogeneous material, U_{if} , U_{mf} and U_{cf} velocities are the same, by definition. In practice, in fluidization of homogeneous particles, there is only one velocity of interest, U_{mf} , as shown in Figura 2.3.

Characteristic fluidization velocities are one kind of result with difficult direct comparison between different studies, since tested conditions generally differ widely: particle size, biomass content on mixtures and bed geometry are parameters of great influence on fluidization phenomena, and which are rarely repeated in tests from different authors.

Even so, U_{mf} found for sugarcane bagasse and sand mixtures by Pérez (2016) were similar to those verified in this research, varying between 0.16 and 0.40 m/s. Biomass

particles used by Pérez (2016) had a Sauter mean diameter of 722 μm , similar to the one used in this research, and biomass mass content in mixtures between 2 and 8%.

Table 6.3 - Experimental characteristic fluidization velocities for sand and mixtures of sugarcane bagasse and straw, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches

Mixture	U_{if} [m/s]	U_{mf} [m/s]	U_{cf} [m/s]
Sand 1	0.16	0.16	0.16
20SB	0.03	0.22	0.32
40SB	0.06	0.26	0.34
60SB	0.06	0.30	0.56
80SB	0.08	0.42	0.84
20SS	0.08	0.20	0.30
40SS	0.06	0.24	0.35
60SS	0.07	0.34	0.82
80SS	-	-	-
20EW	0.04	0.13	0.18
40EW	0.06	0.16	0.30
60EW	0.06	0.38	0.80
80EW	-	-	-
20RH	0.04	0.14	0.30
40RH	0.06	0.20	0.46
60RH	0.06	0.32	0.76
80RH	0.06	0.38	0.82
20AB	0.05	0.11	0.22
40AB	0.06	0.14	0.24
60AB	0.06	0.32	0.52
80AB	0.06	0.36	0.62

6.3.5 Empirical Correlations: Results for Characteristic Fluidization Velocities

Minimum fluidization velocities U_{mf} observed in the fluidization of biomass mixtures and presented at Table 6.3 were compared with a correlation proposed by Paudel and Feng (2013), given by Eq. (2.15). Experimental complete fluidization velocities U_{cf} , also presented at Table 6.3, were compared with a correlation proposed by Lourenço and Tannous (2015), given by Eq. (2.19). These correlations were chosen due to the large amount of experimental data used by the authors to determine the adjustment coefficients: both Paudel and Feng

(2013) and Lourenço and Tannous (2015) evaluated results from more than ten experimental studies.

Comparisons between correlations results and experimental velocities are expressed in Figure 6.4 and Figure 6.5, in which each point refers to an analyzed mixture, with a determined biomass content. In addition to the results obtained for sugarcane bagasse and straw, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches, Figure 6.4, Figure 6.5 and Figure 6.6 present fluidization results from tests conducted jointly with UERGS research group. Sand 2 particles, used in these tests, had a Sauter mean diameter of 232 μm , while for sand 1 this property was 363 μm .

Figure 6.4 shows that the correlation proposed by Paudel and Feng (2013) was unable to predict U_{mf} for most analyzed mixtures. Even for pure sand, the correlation showed an error of about 17%, while for biomass mixtures with sand 1, errors ranged mainly between 30% and 60%. Figure 6.4 also shows that for some biomasses, such as coconut husk and turnip residues, the correlation developed by Paudel and Feng (2013) was unable to predict U_{mf} at any circumstances, with errors greater than 60%.

Figure 6.5 shows that the correlation introduced by Lourenço and Tannous (2015) for U_{cf} did not fit the experimental results precisely. Results for biomass mixtures with sand 2 were quite dispersed, and it was not possible to identify tendencies in the predicted behaviors. It is important to mention that Lourenço and Tannous (2015) considered the envelope density in the characterization of particles, while in this work the true density was used. The difference between the envelope density and the true density increases with the increase of porosity of the materials. For the biomasses used in this work, the differences between these properties are at most 30%, according to Farias (2012) for rice husk, coconut fiber and sugarcane bagasse and Lourenço (2012) for eucalyptus wood.

It is interesting to note that both correlations predicted U_{mf} and U_{cf} for sand 1 with reasonable precision, showing errors of about 20%. These good results for sand are probably related to the origin of these correlations, initially developed for regular particles, which are closer to sand particles shape.

Fluidization tests showed that mixtures with high biomass content are very difficult to fluidize because of formation of preferential channels and agglomerates in bed. These phenomena occurred with all biomasses analyzed, but for mixtures involving sugarcane straw and eucalyptus wood, fluidization was not possible for mixture biomass volume contents over 60%. In mixtures involving coconut shell, the maximum mixture biomass volume content that allowed fluidization was even smaller, of about 50%.

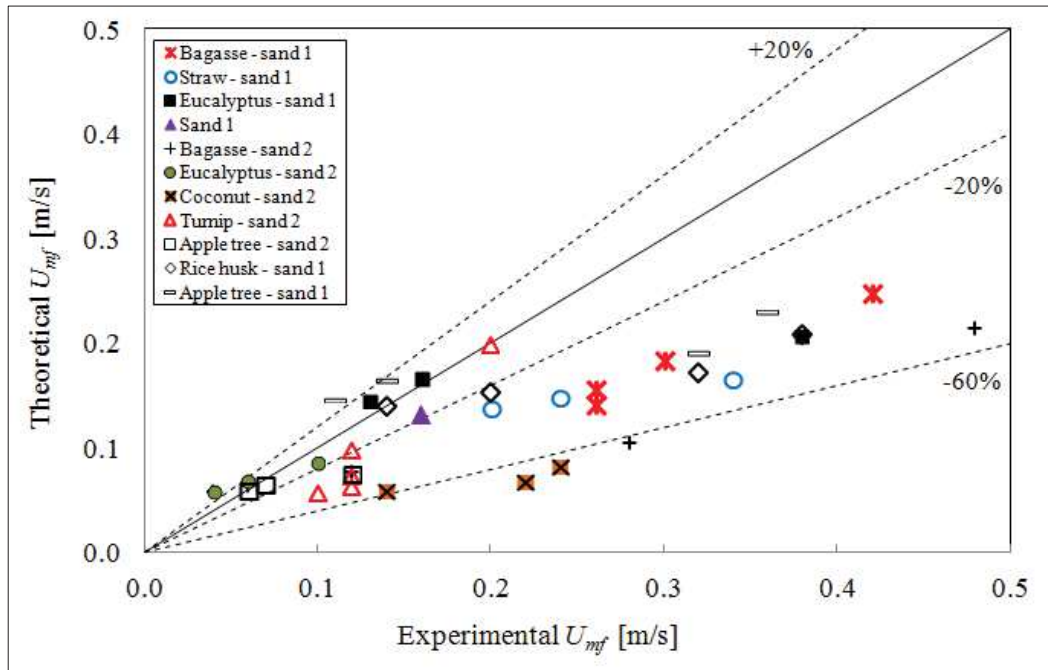


Figure 6.4 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{mf} from an empirical correlation

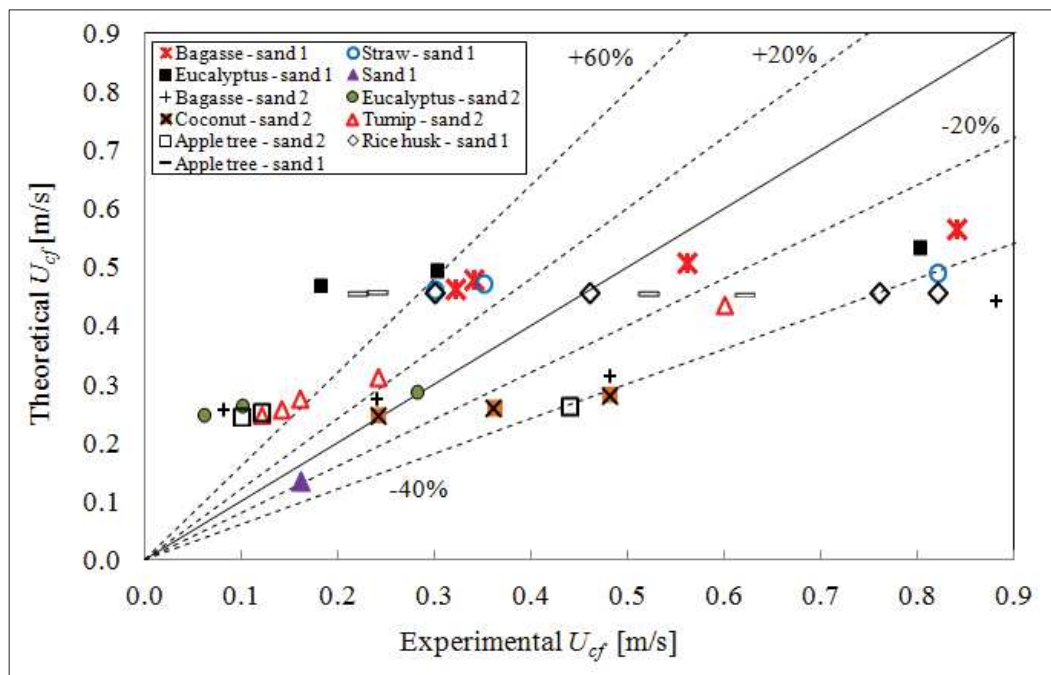


Figure 6.5 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{cf} from an empirical correlation

Figure 6.6 shows experimental Reynolds number as a function of effective Archimedes number of the mixture, at minimum fluidization condition. Re_{mf} values were

calculated by applying experimental U_{mf} obtained for each mixture in Eq. (6.2), while Ar_m values were calculated through Eq. (6.8). Although much of results presented at Figure 6.6 sit within the correlation limits proposed by Paudel and Feng (2013), Figure 6.4 showed significant errors in results from this correlation. Even for mixtures that presented more consistent results with the correlation in Figure 6.6, such as turnip residues and sand 2, or sugarcane bagasse and sand 1, correlation given by Eq. (6.9) was unable to achieve good prediction results for U_{mf} . The dispersion in results presented at Figure 6.6 points out that it is difficult to establish a correlation between Re_{mf} and Ar_m that is sufficiently generalist, capable of representing fluidization behavior of binary mixtures of sand and biomasses with different morphologies.

Analyzing Figure 6.4, Figure 6.5 and Figure 6.6, it is clear that the tested correlations were not effective in predicting characteristic fluidization velocities. The large errors observed may be due to the formulation of these correlations, adapted from correlations initially developed for inert particles, or due to the independent variables analyzed by Paudel and Feng (2013) and by Lourenço and Tannous (2015). Results suggest that these independent variables are insufficient to describe the fluid dynamics behavior of biomass and sand binary mixtures.

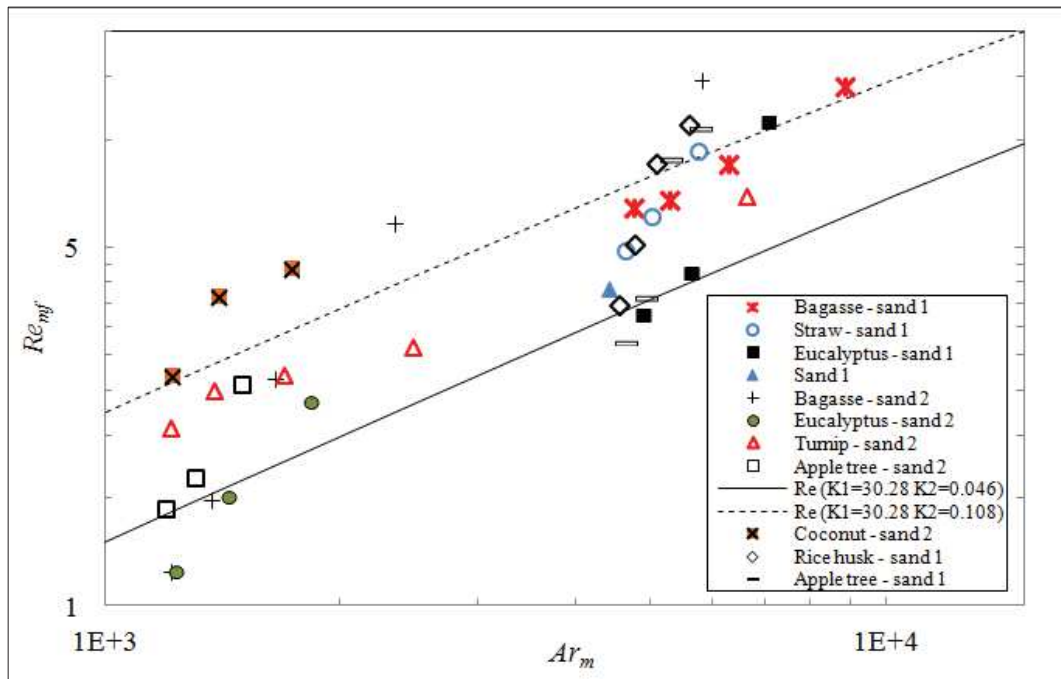


Figure 6.6 - Re_{mf} and Ar_m relation for biomass and sand mixtures

6.4 CONCLUDING REMARKS

This fluidization study of lignocellulosic biomass and sand binary mixtures evaluated the cold fluid dynamics behavior of these mixtures, assessing the characteristic fluidization velocities - initial, minimum and complete, and the bed behavior.

At the physical characterization of the materials, it was possible to identify that biomasses presented diverse values for bulk density, despite the similarity at true density results. This characteristic proved to be relevant at fluidization. Biomasses physicochemical characterization presented consistent results with other studies from literature. The graphical method used to determine the particles sphericity, aspect ratio and mean Feret diameter was accurate, although laborious.

Characteristic fluidization velocities could be determined through evolution of bed pressure drop as a function of superficial gas velocity for most of mixtures. Sugarcane straw and eucalyptus wood mixtures with high biomass content presented bed preferential channels and occurrence of biomass clusters, preventing adequate fluidization. U_{if} values varied between 0.03 and 0.08 m/s for biomass mixtures, while U_{mf} ranged from 0.11 to 0.38 m/s and U_{cf} values ranged from 0.18 to 0.82 m/s for these mixtures.

The evaluated empirical correlations were not effective at U_{mf} and U_{cf} prediction, revealing relative errors larger than 60%, and behaviors often inconsistent with experimental results. It was evident that the formulation and independent variables used by Paudel and Feng (2013) and by Lourenço and Tannous (2015) were insufficient to describe the fluidization behavior of tested biomass and sand binary mixtures.

Fluidization studies of different biomasses and sand mixtures suggests that biomass morphology has a great influence on fluid dynamics behavior of these mixtures. However, currently there does not seem to be a parameter that effectively measures the morphology of irregular particles, as are typically those of biomass. Therefore, the evaluation of other independent variables is relevant in the search for better results in prediction of fluidization behavior and its characteristic velocities for this type of mixtures.

7 EVALUATION OF THE MOST RELEVANT PARAMETERS IN THE FLUIDIZATION OF BIOMASS AND SAND BINARY MIXTURES THROUGH STATISTICAL ANALYSIS

Abstract. Fluidized bed technology stands out as one of the most efficient and feasible alternatives for thermal energy conversions at a low carbon scenario, allowing the use of fuels with irregular particles and high moisture content, like biomasses. Empirical correlations commonly are used to determine fluidization design parameters, such as characteristic velocities, based on properties such as particles mean diameter, sphericity and true density. These properties are difficult to measure for particles with the typical morphology of lignocellulosic biomasses. Thus, these correlations generally show limited practical applicability. The objective of the present work was to verify if other physical and physicochemical parameters could be more appropriate for prediction of characteristic fluidization velocities. Biomasses evaluated were sugarcane straw and bagasse, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches, in binary mixtures with sand in the following proportions: 20, 40, 60 and 80% of biomass volume fraction. Materials were characterized by their mean particle size (Sauter and Feret methods), true density, loose and tapped bulk densities, chemical, proximate and elemental compositions, higher heating value, repose angle, sphericity and aspect ratio. Multiple linear regression analysis was performed on SPSS software, assessing the relevance on the prediction of characteristic velocities of biomass mass fraction in mixtures, mass and bulk densities of mixtures, the particles mean Sauter and Feret diameters and the squares of that diameters, Sauter mean diameter corrected by sphericity and the square of that diameter, repose angles and the contents of cellulose, hemicellulose, lignin, extractives and ashes of mixtures. Multiple linear regression indicated the mixtures bulk densities and repose angles as the most relevant parameters in the prediction of characteristic fluidization velocities. The two developed correlations employed these properties, and attained good results: adjusted R^2 coefficient obtained at U_{mf} prediction was 0.772, while at U_{cf} prediction it was 0.855. For U_{mf} , in 90% of mixtures the relative error found was smaller than 24.3%, while for the U_{cf} in 90% of cases this error was smaller than 22.5%. Proposition of repose angle as a predictor for characteristic fluidization velocities is unprecedented, as well as the acknowledgment of bulk density as the most relevant parameter in the prediction of these velocities.

Key-words: Fluidization. Biomass and sand mixtures. Renewable energy sources. Multiple linear regression. Multiple linear regression.

7.1 INTRODUCTION

Considering the impacts of massive use of fossil fuels at air pollution and global warming, there is an urgent need to encourage and improve the use of renewable energy sources, among which biomass emerges as one of the most relevant on a global scale. In the context of biomass applications, fluidized bed technology is one of the most promising alternatives for biomass thermal energy conversions, either through burning, pyrolysis or gasification. The preference for use of fluidized bed reactors is due to their advantageous

characteristics, such as high heat transfer rates, favorable gas-solid contact, homogeneous bed temperature and possibility of using particles with different properties (mean diameter, true density, sphericity). (LOURENÇO; TANNOUS, 2015).

Lignocellulosic biomass particles usually present varied and particular physical and morphological characteristics, so that many of mathematical models developed for fluidization of spherical or homogeneous particles are not applicable. The use of classical fluidization models often implies in significant errors in the prediction of parameters of interest for biomass fluidization, which is evidenced in several studies, such as those from Fotovat, Chaouki and Bergthorson (2013), Miao et al. (2011), Fotovat et al. (2015) and Paudel and Feng (2013).

Models used to predict biomass mixtures fluidization behavior generally are based on physical characterization of the particles (i. e. mean particles diameter, mass and bulk densities and sphericity). However, lignocellulosic biomass particles generally present complex morphologies, very different from the regular and almost spherical shape from inert particles, such as sand and alumina. This prevents the usual characterization methods from providing good results when applied to biomasses, as evidenced by Lourenço and Tannous (2015). In this context, the objectives of this paper are:

- develop a statistical analysis on the effect of physical and physicochemical characteristics of materials at the characteristic fluidization velocities of biomass and inert binary mixtures;
- propose new correlations for characteristic fluidization velocities, based on the most relevant parameters identified in multiple linear regression.

The increase of the renewable energy share in global energy matrix relies on the economic viability of its employment, which, in turn, depends on the correct design of energy conversion systems. Characteristic fluidization velocities are basic design parameters for fluidized bed systems, and therefore its determination should be as simple and accurate as possible.

7.2 METHODOLOGY

7.2.1 Preparation and Characterization of Samples

Biomasses evaluated were sugarcane straw and bagasse, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches, in binary mixtures with sand in the following proportions: 20, 40, 60

and 80% of biomass volume fraction. Materials were characterized by their mean particle size (Sauter and Feret methods), true density, loose and tapped bulk densities, chemical, proximate and elemental compositions, higher heating value, repose angle, sphericity and aspect ratio. The preparation and characterization of samples are detailed at Ocanha, Zinani and Santos (2017). Table 7.1 shows the results for physical characterization, and also presents the variation range of these results, relative to one standard deviation. Table 7.2 presents the chemical composition and HHV results.

Table 7.1 - Results of physical characterization for sand and biomasses

Parameter	Sand	Sugarcane bagasse	Sugarcane straw	Eucalyptus wood	Apple tree branches	Rice husk
True density [g/cm ³]	2.5870 ±0.0015	1.1646 ±0.0013	1.0018 ±0.0050	1.3272 ±0.0018	1.3781 ±0.0016	1.3746 ±0.0021
Loose bulk density [g/cm ³]	1.499 ±0.028	0.175 ±0.006	0.098 ±0.004	0.250 ±0.008	0.469 ±0.012	0.272 ±0.008
Tapped bulk density [g/cm ³]	2.102 ±0.042	0.226 ±0.007	0.155 ±0.005	0.335 ±0.010	0.517 ±0.015	0.305 ±0.009
Initial bed porosity [%]	42.0	85.0	90.2	81.2	66.0	80.2
Sauter mean diameter [μm]	363.1 ±7.3	840.6 ±39.9	931.4 ±49.4	885.9 ±44.4	507.7 ±21.5	515.8 ±22.5
Feret mean diameter [μm]	378.0 ±17.8	2051.0 ±61.5	2718.1 ±81.8	1993.0 ±49.8	1956.0 ±46.8	1825.3 ±33.2
Sphericity [-]	0.73 ±0.04	0.33 ±0.02	0.31 ±0.03	0.26 ±0.02	0.32 ±0.02	0.36 ±0.02
Aspect ratio [-]	0.67 ±0.03	0.24 ±0.03	0.24 ±0.02	0.23 ±0.02	0.34 ±0.03	0.31 ±0.02
Repose angle [°]	33.8 ±0.7	54.5 ±1.6	59.4 ±1.9	64.0 ±2.3	42.7 ±1.3	46.9 ±0.9

Source: Ocanha, Zinani and Santos (2017).

Table 7.2 - Results of physicochemical characterization for sand and biomasses

Biomass	Cellulose [%]	Hemicellulose [%]	Lignin [%]	Ashes [%]	Extractives [%]	HHV [MJ/kg]
Sugarcane bagasse	41.3	28.1	21.9	3.6	6.4	17.140
Sugarcane straw	37.3	19.9	21.7	3.9	1.9	17.372
Eucalyptus wood	44.8	23.3	27.3	1.3	3.5	18.654
Rice husk	30.6	20.8	26.8	9.9	11.9	16.700

Source: Ocanha, Zinani and Santos (2017).

7.2.2 Determination of Experimental Characteristic Fluidization Velocities

Characteristic fluidization velocities were determined from graphs obtained experimentally from bed pressure drop as a function of superficial gas velocity, as shown at Ocanha, Zinani and Santos (2017). Fluidization tests were performed in triplicate for every biomass and sand binary mixture.

Initial fluidization velocity - U_{if} , minimum fluidization velocity - U_{mf} and complete fluidization velocity - U_{cf} results are presented at Table 7.3. As none of materials or mixtures analyzed showed segregation during fluidization tests, segregation velocity - U_s values were not determined.

Table 7.3 - Experimental characteristic fluidization velocities for sand and mixtures of sugarcane bagasse and straw, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches

Mixture	U_{if} [m/s]	U_{mf} [m/s]	U_{cf} [m/s]
Sand 1	0.16	0.16	0.16
20SB	0.03	0.22	0.32
40SB	0.06	0.26	0.34
60SB	0.06	0.30	0.56
80SB	0.08	0.42	0.84
20SS	0.08	0.20	0.30
40SS	0.06	0.24	0.35
60SS	0.07	0.34	0.82
80SS	-	-	-
20EW	0.04	0.13	0.18
40EW	0.06	0.16	0.30
60EW	0.06	0.38	0.80
80EW	-	-	-
20RH	0.04	0.14	0.30
40RH	0.06	0.20	0.46
60RH	0.06	0.32	0.76
80RH	0.06	0.38	0.82
20AB	0.05	0.11	0.22
40AB	0.06	0.14	0.24
60AB	0.06	0.32	0.52
80AB	0.06	0.36	0.62

Source: Ocanha, Zinani and Santos (2017).

7.2.3 Multiple Linear Regression

Multiple linear regression was the statistical analysis used to identify and evaluate correlations between physical and physicochemical properties of materials and the characteristic fluidization velocities of the biomass and sand binary mixtures. The method application and the verification of its requirements were performed using IBM SPSS 22 software.

Dependent variables in regression analysis were minimum fluidization velocity - U_{mf} and complete fluidization velocity - U_{cf} . Independent variables were biomass mass fraction in the mixtures, loose bulk and mass densities of mixtures, mean particle diameter (Sauter and Feret methods) and the square of that diameter, Sauter mean diameter corrected by the sphericity and the square of this measure, repose angles of the mixtures and mixture contents of cellulose, hemicellulose, lignin, extractives and ashes.

The selection of relevant variables in regression analyses was performed in SPSS using *stepwise* criterion. In this criterion, the software starts the regression using the independent variable that presents the highest Pearson correlation coefficient. From there, the software evaluates which independent variables, if added to the regression, would represent the highest gain in multiple determination coefficient R^2 . Suggested independent variables are added until the increase in R^2 coefficient is no longer significant.

7.3 RESULTS AND DISCUSSION

7.3.1 Multiple Linear Regression

Multiple linear regression was used to correlate characteristic fluidization velocities and independent variables. Results of multiple linear regression for U_{mf} are shown at Table 7.4, Table 7.5 and Table 7.6, and for U_{cf} at Table 7.7, Table 7.8 and Table 7.9.

Table 7.4 shows that only two independent variables were considered by SPSS software for U_{mf} prediction: bulk density and repose angle, disregarding all others. Bulk density alone accounts for 76.5% of U_{mf} variance, as shown by the adjusted R^2 coefficient. With addition of repose angle, the regression model was able to predict 78.2% of U_{mf} variance.

Table 7.5 shows that the significance reached by the regression model was lower than 0.001, much smaller than adopted 0.05 criterion. Therefore, it is possible to say with more

than 99% confidence that the independent variables used are able to predict U_{mf} behavior. Table 7.6 shows the standardized and unstandardized coefficients, in addition to the variation range for a 90% confidence interval. This means that at least 90% of the results should lie between these proposed limits.

Table 7.4 - Multiple linear regression results for U_{mf}

Predictors	R	R ²	Adjusted R ²	Standard error of estimate
Bulk density	0.877	0.769	0.765	0.0463
Bulk density, repose angle	0.889	0.790	0.782	0.0447

Table 7.5 - Significance of multiple linear regression for U_{mf}

Model	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F	Significance
Regression	0.404	2	0.202	101.278	0.000
Residuals	0.108	54	0.002		

Table 7.6 - Coefficients and confidence interval of multiple linear regression for U_{mf}

Predictors	Unstandardized coefficients	Standardized coefficients	Significance	90% Confidence interval	
				Lower	Upper
Constant	0.280	-	0.017	0.089	0.470
Repose angle	0.00566	0.196	0.027	0.148	0.983
Bulk density	-0.248	-0.741	0.000	-0.296	-0.199

For U_{cf} prediction, SPSS considered bulk density, repose angle and Sauter mean diameter corrected by sphericity as the relevant variables for the regression model. Table 7.7 shows that, again, bulk density alone accounts for most of the variance of the dependent variable, and the relevance of this parameter is even greater than in U_{mf} prediction. In U_{cf} prediction, bulk density accounts for 83.1% of the variance. When repose angle is also considered, prediction rises to 85.5% of the variance, reaching 86.8% when corrected Sauter mean diameter is added to the analysis.

Table 7.7 - Multiple linear regression results for U_{cf}

Predictors	R	R ²	Adjusted R ²	Standard error of estimate
Bulk density	0.913	0.834	0.831	0.0983
Bulk density, repose angle	0.928	0.861	0.855	0.0910
Bulk density, repose angle, corrected Sauter	0.936	0.875	0.868	0.0868

Table 7.8 - Significance of multiple linear regression for U_{cf}

Model	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F	Significance
Regression	2.805	3	0.935	124.068	0.000
Residuals	0.399	56	0.008		

Table 7.9 - Coefficients and confidence interval of multiple linear regression for U_{cf}

Predictors	Unstandardized coefficients	Standardized coefficients	Significance	90% Confidence interval	
				Lower	Upper
Constant	0.624	-	0.009	0.241	1.007
Bulk density	-0.730	-0.873	0.000	-0.844	-0.616
Repose angle	0.02171	0.301	0.000	1.280	3.062
Corrected Sauter	-0.411	-0.215	0.015	-0.686	-0.136

Table 7.8 shows that the significance reached by the regression model was lower than 0.001, much smaller than the 0.05 criterion adopted. Therefore, it is possible to say with more than 99% confidence that the independent variables used are able to predict the U_{cf} variance. In addition to the standardized and unstandardized coefficients, Table 7.9 shows that each independent variable also presented, individually, significances smaller than 0.05, as proposed by the SPSS *stepwise* criterion. Table 7.9 also shows the coefficients variation range for a 90% confidence interval.

Table 7.10 summarizes the adjusted R² determination coefficients found for different combinations of independent variables used at U_{mf} and U_{cf} prediction. It can be seen at Table 7.10 that at both U_{mf} and U_{cf} analysis, bulk density and repose angle account for a significant portion of variance prediction. Both properties are fairly easy to measure and compare, not requiring expensive equipment or time-consuming analysis, like many of other independent variables. Thus, although corrected Sauter mean diameter has been pointed out as relevant in U_{cf} case, only repose angle and bulk density were considered for the new correlations

introduced for U_{mf} and U_{cf} prediction. The addition of corrected Sauter mean diameter would provide little increase in R^2 coefficient, and would require the determination of the particles Sauter mean diameter and sphericity, both time consuming analyses.

Table 7.10 - Summary of R^2 coefficients from U_{mf} and U_{cf} prediction by multiple linear regression

Independent variables	Adjusted R^2	
	U_{mf}	U_{cf}
Bulk density, repose angle	0.782	0.855
Bulk density, repose angle, corrected Sauter	0.778	0.868
Bulk density, repose angle, squared Sauter	0.780	0.858
Bulk density, repose angle, Sauter	0.779	0.860
Bulk density, repose angle, Feret	0.778	0.866
Bulk density, repose angle, squared Feret	0.778	0.866

Regarding the biomasses composition in cellulose, hemicellulose, lignin, extractives and ashes, the regression analysis did not indicate any relevant correlation between this composition and the characteristic fluidization velocities. The same was true for elemental and proximate biomass compositions, whose correlations with U_{mf} and U_{cf} would present even less physical meaning.

7.3.2 New Correlations

According to the results obtained through multiple linear regression on SPSS, two new correlations were developed for U_{mf} and U_{cf} prediction, given by Eq. (7.1) and Eq. (7.2). At these equations, ρ_{apm} refers to bulk density of each mixture, given in g/cm^3 , and α refers to repose angle, given in degrees.

$$U_{mf} = 0,280 - 0,248\rho_{apm} + 0,00566 \alpha \quad (7.1)$$

$$U_{cf} = 0,478 - 0,634\rho_{apm} + 0,01622 \alpha \quad (7.2)$$

Results of these correlations are shown at Figure 7.1 for U_{mf} and at Figure 7.2 for U_{cf} . Data from sand 1 mixtures were used in the correlations formulation, while data from sand 2 mixtures were used only in the validation of these correlations.

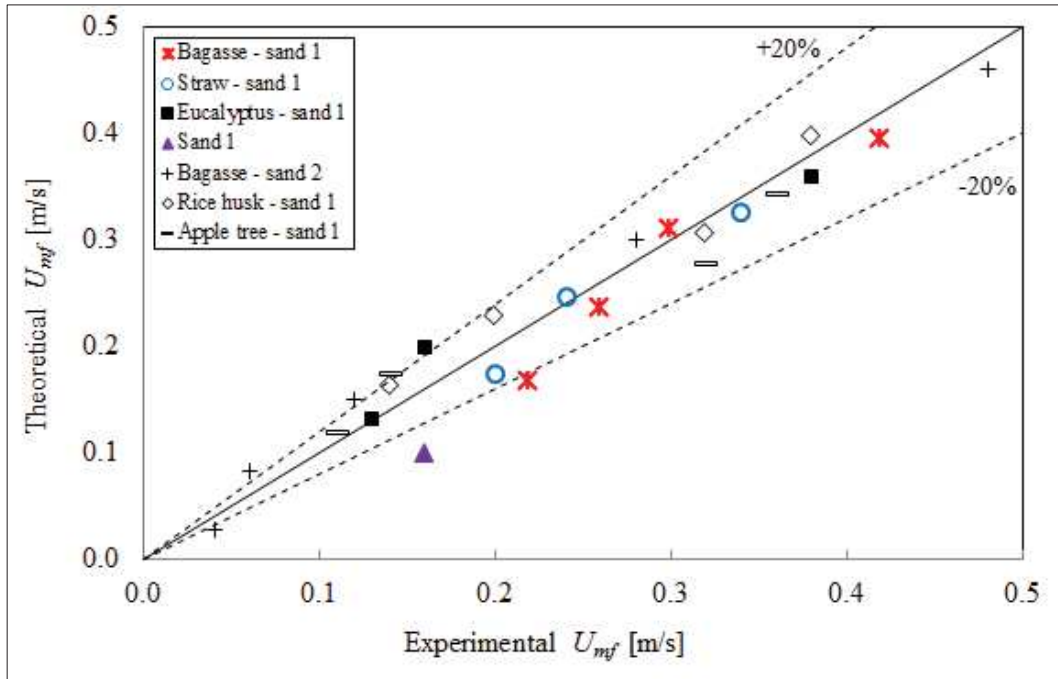


Figure 7.1 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{mf} from developed correlation

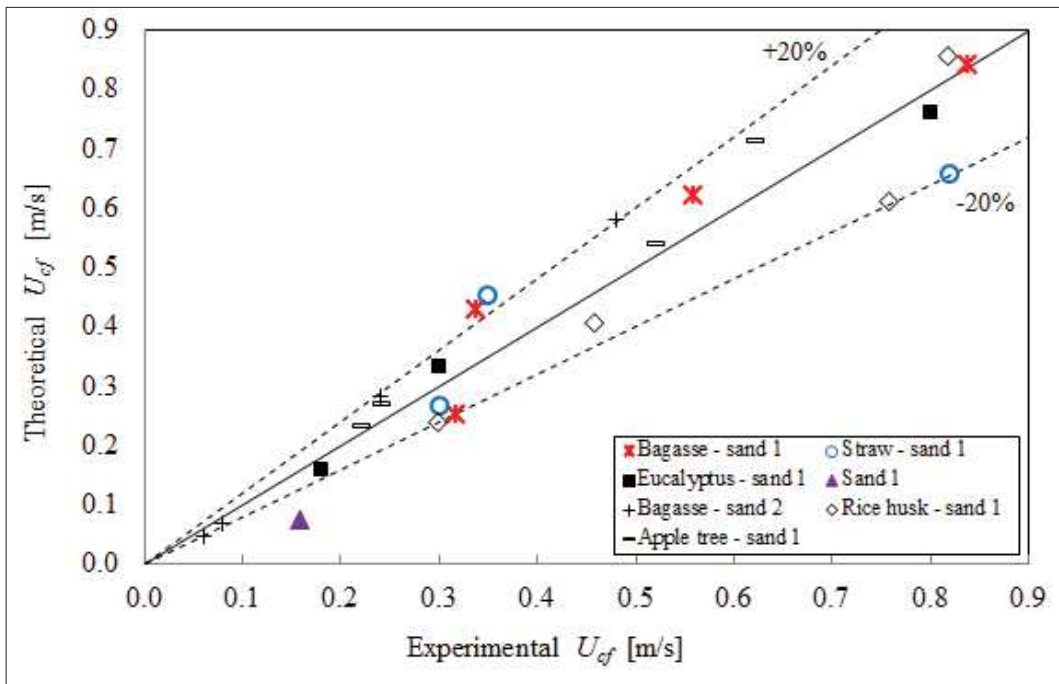


Figure 7.2 - Comparison between experimental and theoretical results for U_{cf} from developed correlation

Figure 7.1 shows that results predicted by the introduced correlation for U_{mf} were approximately within a relative error range of 20%. It is interesting to note that the error found for pure sand was the largest, suggesting that the correlation is not suitable to regular

particles. This phenomenon differs from what was found at results from Paudel and Feng (2013) correlation, where the predicted U_{mf} value for pure sand presented a smaller error than the majority of evaluated mixtures.

Figure 7.2 shows similar results for U_{cf} : relative error values varied within a range of about 20%, except for pure sand, which presented a greater error. Proposed correlations were effective in the prediction of both U_{mf} and U_{cf} , including mixtures with a different sand, which reinforces the applicability and accuracy of these correlations, despite their simplicity. Relative errors verified for all evaluated mixtures are shown at Table 7.11.

Table 7.11 - Relative errors from U_{mf} and U_{cf} prediction

Materials	Mixture	U_{mf} [m/s]	U_{cf} [m/s]	Theoretical U_{mf} [m/s]	Theoretical U_{cf} [m/s]	U_{mf} relative error [%]	U_{cf} relative error [%]
Sand 1	-	0.16	0.16	0.10	0.08	-37.8	-52.7
Sugarcane bagasse - sand 1	20SB	0.22	0.32	0.17	0.25	-23.9	-21.9
	40SB	0.26	0.34	0.24	0.43	-9.0	25.8
	60SB	0.30	0.56	0.31	0.62	3.6	10.7
	80SB	0.42	0.84	0.39	0.84	-6.1	0.0
Sugarcane straw - sand 1	20SS	0.20	0.30	0.17	0.27	-13.3	-11.3
	40SS	0.24	0.35	0.25	0.45	2.4	29.1
	60SS	0.34	0.82	0.32	0.66	-4.4	-19.9
Eucalyptus wood - sand 1	20EW	0.13	0.18	0.13	0.16	0.9	-11.6
	40EW	0.16	0.30	0.20	0.33	24.0	10.9
	60EW	0.38	0.80	0.36	0.76	-5.8	-5.2
Sugarcane bagasse - sand 2	10SB	0.04	0.06	0.03	0.05	-28.7	-22.6
	30SB	0.06	0.08	0.08	0.07	37.6	-13.7
	50SB	0.12	0.24	0.15	0.28	24.4	17.3
	70SB	0.28	0.48	0.30	0.58	7.0	21.1
	90SB	0.48	0.88	0.46	0.93	-4.1	5.3
Rice husk - sand 1	20RH	0.14	0.30	0.16	0.24	16.5	-20.2
	40RH	0.20	0.46	0.23	0.41	14.3	-11.3
	60RH	0.32	0.76	0.31	0.61	-4.3	-19.5
	80RH	0.38	0.82	0.40	0.86	4.7	4.3
Apple tree branches - sand 1	20AB	0.11	0.22	0.12	0.23	8.2	6.3
	40AB	0.14	0.24	0.17	0.27	24.1	12.0
	60AB	0.32	0.52	0.28	0.54	-13.0	4.0
	80AB	0.36	0.62	0.34	0.71	-4.6	14.8

It can be seen at Table 7.11 that for U_{mf} prediction, the greatest relative error verified in biomass and sand mixtures was 37.6%, but for 90% of mixtures the error found was less

than 24.3%, and for 75% of mixtures the error found was less than 20.2%. At U_{cf} prediction, the biggest relative error observed for mixtures was 29.1%, but for 90% of cases this error was below 22.5%, and for 75% of mixtures the error found was less than 20.0%.

7.4 CONCLUDING REMARKS

This statistical analysis of fluidization of lignocellulosic biomass and sand binary mixtures evaluated physical and physicochemical characteristics of the materials, seeking to identify which ones present greater relevance in the prediction of characteristic fluidization velocities. Biomasses evaluated were sugarcane straw and bagasse, eucalyptus wood, rice husk and apple tree branches, in binary mixtures with sand in the following proportions: 20, 40, 60 and 80% of biomass volume fraction. The statistical method used was multiple linear regression, held on the SPSS software.

Multiple linear regression showed that only two independent variables were considered by SPSS software for U_{mf} prediction: bulk density and repose angle. For U_{cf} prediction, SPSS considered bulk density, repose angle and Sauter mean diameter corrected by sphericity as the relevant variables for the regression model. Bulk density alone accounts for most of both characteristic velocities variance, with repose angle adding a little more prediction to the model. Therefore, although corrected Sauter mean diameter has been pointed out as relevant in U_{cf} case, only repose angle and bulk density were considered for the new correlations introduced for U_{mf} and U_{cf} prediction.

Through developed correlations, at U_{mf} prediction the greatest relative error verified in biomass and sand mixtures was 37.6%, but for 90% of mixtures this error was less than 24.3%. At U_{cf} prediction, the biggest relative error observed for mixtures was 29.1%, but for 90% of cases this error was below 22.5%.

Proposition of repose angle as a predictor for characteristic fluidization velocities is unprecedented, as well as the acknowledgment of bulk density as the most relevant parameter in the prediction of these velocities. Developed correlations, despite their simplicity, were very effective at U_{mf} and U_{cf} prediction, reaching superior results than several correlations from literature. In addition, introduced correlations were based on properties fairly easy to measure and compare, not requiring expensive equipment or time-consuming analysis, which reinforces the importance and worth of these correlations.

8 CONCLUSÕES

Como muito tem sido discutido principalmente ao longo da última década, urge a substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis, em virtude das mudanças climáticas causadas principalmente pela utilização massiva destes combustíveis em uma escala global. As biomassas, dada a sua disponibilidade geográfica e quantitativa, despontam como uma proeminente alternativa, principalmente na geração de energia elétrica e térmica para fins industriais. Este cenário de valorização das biomassas é ainda mais favorável no Brasil, país que já apresenta uma utilização expressiva de energias renováveis na matriz energética, principalmente graças aos derivados da cana-de-açúcar.

Neste contexto, o presente estudo de fluidização de biomassas lignocelulósicas em misturas binárias com areia procurou avaliar o comportamento fluidodinâmico a frio dessas misturas, quantificando as velocidades características de fluidização - inicial, mínima e completa, e o comportamento do leito.

Na caracterização física dos materiais foi possível identificar que as biomassas apresentaram valores de massa específica aparente variados, apesar da semelhança nos resultados de massa específica real. Essa característica posteriormente se mostrou muito relevante na fluidização. A caracterização físico-química das biomassas apresentou resultados coerentes com outros trabalhos da literatura.

O método gráfico empregado para a determinação da esfericidade, da razão de aspecto e do diâmetro médio de Feret das partículas se mostrou preciso, embora trabalhoso: a avaliação no software ImageJ deve empregar um número elevado de imagens, a fim de contemplar o universo das partículas analisadas.

As velocidades características de fluidização puderam ser determinadas através das curvas de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, conforme já realizado em outros trabalhos da literatura. Os valores de U_{if} variaram entre 0,03 e 0,08 m/s para as misturas de biomassa. A U_{mf} variou entre 0,11 e 0,38 m/s, enquanto os valores de U_{cf} variaram entre 0,18 e 0,82 m/s para estas misturas.

As correlações empíricas avaliadas não foram eficazes na predição de U_{mf} e U_{cf} , apresentados erros relativos superiores a 60%, e comportamentos muitas vezes incoerentes com os resultados experimentais. Ficou evidente que a formulação e as variáveis independentes utilizadas por Paudel e Feng (2013) e por Lourenço e Tannous (2015) foram insuficientes para descrever o comportamento de fluidização das misturas de biomassa e areia.

A regressão linear múltipla realizada no software SPSS foi eficaz na identificação dos parâmetros mais relevantes na predição do comportamento fluidodinâmicos das misturas binárias de biomassa e areia. Os resultados mostraram que a massa específica aparente da mistura é a propriedade de maior influência nas velocidades características de fluidização, por larga margem. Essa propriedade respondeu, sozinha, por 76,5% da variância dos resultados de U_{mf} , e por 83,1% da variância de U_{cf} . Este é um resultado muito relevante, uma vez que as correlações clássicas, em função da sua formulação partindo de partículas inertes, usualmente utilizam a massa específica real. Além disso, a massa específica aparente é uma propriedade cuja determinação é bastante simples e rápida, o que valoriza ainda mais a sua relevância.

A regressão linear múltipla identificou ainda o ângulo de repouso estático como um parâmetro relevante, tanto na predição de U_{mf} quanto de U_{cf} . Este é outro resultado proeminente e novo, já que não foi encontrada na literatura menção a esse parâmetro como preditor de comportamento fluidodinâmico. A contribuição do ângulo de repouso estático na predição das variâncias das velocidades características de fluidização foi, no entanto, muito menor do que a da massa específica aparente.

As novas correlações propostas a partir dessas duas propriedades - massa específica aparente e ângulo de repouso - das misturas obtiveram bons resultados na predição de U_{mf} e U_{cf} em misturas binárias de biomassa e areia. Na comparação de U_{mf} , o maior erro relativo observado foi de 37,6%, mas para 90% das misturas o maior erro encontrado foi inferior a 24,3% e, para 75% das misturas, o maior erro encontrado foi inferior a 20,2%. Na previsão de U_{cf} , o maior erro relativo observado para as misturas foi de 29,1%, mas para 90% dos casos esse erro foi inferior a 22,5%, e para 75% das misturas o maior erro encontrado foi inferior a 20,0%.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M.Z. et al. Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, n. 24, p. 487–494, June 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00150-2)>. Acesso em: 08 jun. 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C604**: Standard Test Method for True Specific Gravity by Gas-Comparison Pycnometer. West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D6761**: Standard Test Method for Determination of the Total Pore Volume of Catalysts and Catalyst Carriers. West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7481**: Standard Test Methods for Determining Loose and Tapped Bulk Densities of Powders using a Graduated Cylinder. West Conshohocken, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E1131**: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. West Conshohocken, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM-ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, 1997.
- ATAÍDE, C. H., CARDOSO, C. R., OLIVEIRA, T., J. Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: Minimum fluidization velocity and particle segregation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Amsterdam, v. 72, p. 113–121, Oct. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.06.010>>. Acesso em: 05 maio 2016.
- BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Boca Raton: CRC Press, 2006. 496 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Projeções do Agronegócio**. Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio>>. Acesso em 16 nov. 2016.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia do Brasil. **Plano Nacional Energético 2030**. Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>>. Acesso em 19 fev. 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **BEN - Balanço Energético Nacional**. Brasil, 2016. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese2016.aspx>>. Acesso em: 07 abr. 2016.
- BRAZ, C. E. **Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia**. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado em Química), Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/115659?show=full>>. Acesso em: 05 abr. 2017.

- CARVALHO, D. M. **Caracterização físico-química e polpação etanol/soda do bagaço e da palha de cana-de-açúcar**. 2012. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: <<http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3094/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 05 jun. 2017.
- CHEVANAN, N. et al.. Loose-filled and tapped densities of chopped switchgrass, corn stover and wheat straw. In: ASABE Annual International Meeting, 2008, Providence, Rhode Island. Disponível em: <<http://www.biomasslogistics.org/Publications/20chevanan.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2016.
- CORTEZ, L. A. B. et al.. **Biomassa: para energia**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2009.
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.
- CUI, H., GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects. **Chemical Engineering Science**, Amsterdam, v. 62, p. 45–55, Jan. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.006>>. Acesso em: 23 set. 2016.
- EIA - USA Energy Information Administration. Estados Unidos, 2016. Disponível em <<https://http://www.eia.gov>>. Acesso em: 08 abr. 2016.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.embrapa.br>>. Acesso em 17 abr. 2017.
- FARIAS, F.M.O. **Caracterização de biomassas brasileiras para aproveitamento energético**. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266820>>. Acesso em: 21 jan. 2017.
- 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**, Amsterdam, v. 102, p. 129–138, Oct. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.042>>. Acesso em: 19 out. 2016.
- FOTOVAT, F. et al. A CPFD model for a bubbly biomass–sand fluidized bed. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 275, p. 39–50, May 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.005>>. Acesso em: 24 ago. 2016.
- GAN, S. et al. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 159, p. 287–305, May 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.029>>. Acesso em: 05 jun. 2017.
- GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.
- GENEHR, G. A. **Caracterização da fluidização de biomassas de cascas de madeiras em leitos polidispersos**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), 2015.

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.

HARRIS, D. C. **Análise química quantitativa**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

IEA - International Energy Agency. **Key Renewable Trends**. Paris, 2017. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyRenewablesTrends.pdf>>. Acesso em 15 fev. 2017.

IEA - International Energy Agency. **Key World Energy Statistics – 2016**. Paris, 2016. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>>. Acesso em 18 fev. 2017.

IEA - International Energy Agency. **World Energy Outlook – 2015**. Paris, 2015. Disponível em: <http://www.iea.org/bookshop/700-World_Energy_Outlook_2015>. Acesso em 18 fev. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1928**: Solid mineral fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value. Genebra, 2009.

JURADO, N. et al. Effect of co-firing coal and biomass blends on the gaseous environments and ash deposition during pilot-scale oxy-combustion trials. **Fuel**, Amsterdam, v. 197, p. 145–158, June 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.111>>. Acesso em: 08 jun. 2017.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1991.

LOURENÇO, J. B. **Estudo das características fluidodinâmicas de misturas da madeira de eucalipto e do caroço do fruto do tucumã com inerte visando aplicação em processos de termoconversão**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

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

MACHADO, G. D. **Caracterização e avaliação do potencial dos resíduos gerados na indústria sucroenergética em processos de biorrefinaria**. 2016. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, Novo Hamburgo, 2016.

MARTÍNEZ, J. D. et al. Assessment of the rice husk lean-combustion in a bubbling fluidized bed for the production of amorphous silica-rich ash. **Energy**, Amsterdam, v. 36, p.3846-3854, June, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.031>>. Acesso em: 19 nov. 2016.

MCDONALD, J.H. **Handbook of Biological Statistics**. 3. ed. Baltimore: Sparky House, 2014. 305 p.

MIAO, Q. et al. Fluidization of sawdust in a cold model circulating fluidized bed: Experimental study. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 167, p. 335–341, Feb. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.12.080>>. Acesso em: 22 out. 2016.

MIAO, Z. et al. Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 33, p. 504-513, March 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.016>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

NATARAJAN, E.; SETHUPATHY, B. Hydrodynamic study on gasification of biomass in a fluidized bed gasifier. **International Journal of Engineering Science and Technology**, Vandalur, v. 4, p. 316-323, Jan. 2012.

OCANHA, E. S.; ZINANI, F. S.; SANTOS, F. Fluidization study of lignocellulosic biomasses and its physical, chemical and morphological characteristics. 2017. *In preparation*.

OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcel Dekker, 2004.

OLATUNDE, G. et al. Size measurement method for Loblolly Pine grinds and influence on predictability of fluidization. **Canadian Biosystems Engineering Journal**, Winnipeg, Volume 58, p. 78-89, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.7451/CBE.2016.58.4.1>>. Acesso em: 25 set. 2017.

PAUDEL, B.; FENG, Z. G. Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 237, p. 134-140, March 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.031>>. Acesso em: 23 set. 2016.

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**, Amsterdam, v. 124, p. 188-197, Aug. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.003>>. Acesso em: 03 set. 2016.

PÉREZ, N. P. et al. Comportamento fluidodinâmico de partículas de bagaço de cana-de-açúcar. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 9., 2016, Fortaleza. **Anais eletrônicos**. Fortaleza, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.20906/CPS/CON-2016-0104>>. Acesso em: 13 jan. 2017.

PÉREZ, N. P. et al. Fluid-dynamic assessment of sugarcane bagasse to use as feedstock in bubbling fluidized bed gasifiers. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 73, p. 238-244, Dec. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.048>>. Acesso em: 09 jan. 2017.

RAYE, F. et al. Avaliação do potencial energético da casca de arroz cultivado no Rio Grande do Sul. **VI Salão Integrado Ensino, Pesquisa e Extensão, II Jornada de Pós-Graduação, I Seminário Estadual sobre Territorialidade**, Brasil, ago. 2016. Disponível em: <<http://conferencia.uergs.edu.br/index.php/SIEPEX/visiepex/paper/view/1456/482>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

- REZAEI, H. et al. Size, shape and flow characterization of ground wood chip and ground wood pellet particles. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 307, p. 737-749, July 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.016>>. Acesso em: 23 set. 2017.
- ROSA, A. V. **Fundamentals of renewable energy processes**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2013. 908 p.
- ROUSSET, P. et al. The fluidization behaviour of torrefied biomass in a cold model. **Fuel**, Amsterdam, v. 102, p. 256–263, Dec. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.007>>. Acesso em: 09 maio 2016.
- SANTOS, F. et al. **Bioenergia e Biorrefinaria – Cana-de-açúcar e Espécies Florestais**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013.
- SANTOS, F. et al. Cenários e perspectivas das principais culturas do Rio Grande do Sul em processos de biorrefinaria. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 291-306, dez. 2016. Disponível em: <<http://revista.uergs.edu.br/index.php/revuergs/article/view/466>>. Acesso em 10 maio 2017.
- SANTOS, F. et al. Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico. **Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 56-62, fev. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422014000100011>. Acesso em: 05 maio 2017.
- SBS - Sociedade Brasileira de Silvicultura. Brasil, 2017. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br>>. Acesso em 12 mar. 2017.
- TANNOUS, K. et al. Physical Properties for Flow Characterization of Ground Biomass from Douglas Fir Wood. **Particulate Science and Technology**, London, n. 31, p. 291–300, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/02726351.2012.732676>>. Acesso em: 25 ago. 2016.
- TAPPI - American Paper & Pulp Association. **Standards and Methods**. EUA, 2017. Disponível em: <<http://www.tappi.org/publications-standards/standards-methods>>. Acesso em 16 abr. 2017.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **T204om-88**: Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, 1996.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **T211om-02**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard. Atlanta, 2002.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **T222om-11**: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta, 2011.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). **T264cm-88**: Preparation of Wood for Chemical Analysis. Atlanta, 1988.
- WANG, W. et al. Experimental study on the angle of repose of pulverized coal. **Particuology**, Amsterdam, v. 8, p. 482-485, Oct. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.07.008>>. Acesso em: 08 abr. 2017.

WEC - World Energy Council. Londres, 2017. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

WEN, C.Y.; YU, Y.H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. **AIChE Journal**, n. 12, p. 610–612, 1966. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/aic.690120343>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

XU, F. et al. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 104, p. 801–809, April 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.019>>. Acesso em: 12 jun. 2016.

YAMAJI, F. M. et al. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, vol. 28, n.1, p.11-15, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2013v28n1p11-15>>. Acesso em 06 mar. 2017.

YANG, W. et al. Performance evaluation of co-firing various kinds of biomass with low rank coals in a 500 MWe coal-fired power plant. **Energy**, Amsterdam, v. 115, p. 954–962, Nov. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.060>>. Acesso em: 23 fev. 2017.

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

ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999. 931 p.