



JOANA BRATZ LOURENÇO

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FLUIDODINÂMICAS DE MISTURAS
DA MADEIRA DE EUCALIPTO E DO CAROÇO DO FRUTO DO
TUCUMÃ COM INERTE VISANDO APLICAÇÃO EM PROCESSOS DE
TERMOCONVERSÃO**

CAMPINAS

2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

JOANA BRATZ LOURENÇO

**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**

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Katia Tannous

Tese de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestra em Engenharia Química na área de concentração Engenharia de Processos

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA JOANA
BRATZ LOURENÇO E ORIENTADA PELA PROF.^a
DR.^a KATIA TANNOUS

A handwritten signature in blue ink, reading "Katia Tannous", is written over a horizontal line.

CAMPINAS

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

L934e Lourenço, Joana Bratz
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 / Joana Bratz Lourenço. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientadora: Katia Tannous.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Biomassa. 2. Leito fluidizado. 3. Propriedades físicas. 4. Propriedades químicas. 5. Propriedades térmicas. I. Tannous, Katia, 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Study of fluid dynamic characteristics of mixtures of eucalyptus wood and *tucumã* endocarp with inert for application in thermal conversion processes

Palavras-chave em Inglês: Biomass, Fluidized bed, Physical properties, Chemical properties, Thermal properties

Área de concentração: Engenharia de Processos

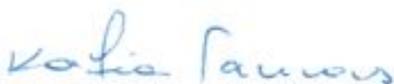
Titulação: Mestra em Engenharia Química

Banca examinadora: Caio Glauco Sánchez, Juan Miguel Mesa Perez

Data da defesa: 31-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Joana Bratz Lourenço e aprovada em 31 de julho de 2012 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof.^a. Dr.^a. Katia Tannous

Orientadora



Dr. Juan Miguel Mesa Pérez

Membro Titular



Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

Membro Titular

Campinas

2012

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.

A handwritten signature in blue ink, reading "Katia Tannous", is positioned above a thin horizontal line.

Orientadora: Katia Tannous

Dedico este trabalho ao Maiquel e a minha família, por acreditarem sempre em mim e respeitarem meus sonhos. Em memória de meu pai, que não pode ver esta vitória.

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Katia Tannous pela orientação e amizade.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Aos professores Antônio Carlos Luz Lisboa e Caio Glauco Sánchez que gentilmente cederam seus laboratórios para a realização das análises térmicas deste trabalho.

Aos professores Sandra Maria Carmello-Guerreiro e Paulo Mazzafera que gentilmente cederam seus laboratórios para a realização de experimentos de microscopia de luz e composição química.

À Suzano Papel e Celulose, por ceder material para este estudo.

Aos funcionários e colegas de laboratório.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias entre as biomassas madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e o caroço do fruto do tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), e areia como inerte, visando à aplicação em processos de termoconversão que utilizam a tecnologia de leito fluidizado. Os experimentos foram realizados em uma coluna de acrílico de diâmetro interno de 0,092 m. Os materiais escolhidos pertenceram às categorias A, B e D da classificação de Geldart. Os diâmetros médios de Sauter estudados foram entre 332 μm – 2017 μm ; esfericidades entre 0,36 - 0,90; massa específica aparente entre 395 kg/m^3 - 2636 kg/m^3 e massa específica real entre 1425 kg/m^3 - 2657 kg/m^3 . Na análise morfológica, verificaram-se para as duas biomassas a presença de elementos de vasos, pontoações e células parenquimáticas, além de ser identificado esclereídes para o caroço do fruto do tucumã e fibras para o eucalipto. Avaliando estas estruturas, comprovou-se a elevada porosidade para o eucalipto (0,75) em relação ao caroço do fruto do tucumã (0,23). Pela análise elementar, o oxigênio e o carbono representaram a maior parte da composição das biomassas (~93 %), enquanto que pela análise imediata os teores de material volátil e carbono fixo são os componentes majoritários (~99 %). Pela análise termogravimétrica, a máxima degradação mássica ocorreu em torno de 400°C (celulose). O poder calorífico superior e inferior das biomassas foram inferiores a 21 MJ/kg. Para os ensaios fluidodinâmicos, foram determinadas as velocidades características: fluidização inicial (U_{fi}), aparente (U_{fa}), de segregação (U_s) e completa (U_{fc}); porosidades aparente (ε_{fa}) e completa (ε_{fc}) e expansão do leito. Os métodos utilizados foram: a evolução da queda de pressão total, desvio padrão das flutuações de pressão total e expansão do leito. As influências analisadas foram a natureza da biomassa, razão de diâmetro médio (1,5 - 6) e razão da fração mássica (5 % - 20 %) entre biomassa e inerte. Os resultados mostraram que: para todas as misturas, a U_{fi} é caracterizada pela velocidade mínima de fluidização do inerte; para a mistura eucalipto/inerte, U_{fa} , U_s e U_{fc} foram crescentes com o aumento da razão de fração mássica, sendo mais significativa com o aumento da razão de diâmetro médio, enquanto que para a mistura tucumã/inerte, as velocidades características aumentaram lentamente com a razão da fração mássica e diâmetro médio de biomassa na mistura; a região de segregação aumentou com a razão da fração mássica para todos os diâmetros, sendo no máximo de 2,4 e 1,6 para o eucalipto e tucumã, respectivamente; para a mistura eucalipto/inerte, as ε_{fa} e ε_{fc} foram pouco influenciadas para frações abaixo de 20 % devido à presença de pistões no leito, e a expansão foi mais significativa para menores razões de frações mássicas e diâmetro médio de biomassa; para a mistura tucumã/inerte as ε_{fa} e ε_{fc} , e a expansão foram pouco influenciadas por estes parâmetros. Faixas de mistura efetiva foram propostas, conforme: $1 < Re_{fa} < 20$ e $1 < Re_{fc} < 37$, e $200 < Ar_m < 12500$. Equações empíricas foram propostas, mediante equações de ajuste em série de potência e pela equação de Ergun para determinação de Re_{fa} e Re_{fc} , com erros relativos médios absolutos de 25 % e 44 %, respectivamente, para os melhores ajustes.

Palavras chave: Biomassa, Leito fluidizado, Propriedades físicas, Propriedades químicas, Propriedades térmicas

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the fluid dynamic behavior of binary mixtures between biomasses, eucalyptus wood (*Eucalyptus grandis*) and *tucumã* endocarp (*Astrocaryum aculeatum*), and inert (sand), aiming the application in thermoconversion processes that use the fluidized bed technology. The experiments were carried out in an acrylic column with an internal diameter of 0.092 m. The materials chosen are belonging to categories A, B and D of Geldart classification. The mean Sauter diameters studied were between 332 μm and 2017 μm ; the sphericity, between 0.36 and 0.90; the apparent density, between 395 kg/m^3 and 2636 kg/m^3 , and true density, between 1425 kg/m^3 and 2657 kg/m^3 . In the morphological analysis, for the two biomasses we noticed the presence of vessel elements, pits and parenchyma cells, besides identifying sclereids for the *tucumã* endocarp and fibers for the eucalyptus. The evaluation of these structures showed the high porosity for the eucalyptus (0.75) comparing to the *tucumã* endocarp (0.23). In the proximate analysis, oxygen and carbon consisted on the largest part of the biomass composition (~93 %), while in the ultimate analysis the volatile material content and fixed carbon represent around 99 %. Thermogravimetric analysis showed that the maximum mass degradation was around 400°C (cellulose). The higher heating value and lower heating values of the biomasses were less than 21 MJ/kg. In the fluid dynamic experiments, the characteristic velocities were determined: initial (U_{if}), apparent (U_{af}), segregation (U_s) and complete (U_{cf}) fluidization; apparent (ϵ_{af}) and complete (ϵ_{cf}) porosities and bed expansion. The methods used were: the evolution of total pressure drop, the standard deviation of total pressure fluctuation and bed expansion. The influences analyzed were the kinds of biomass, the mean diameter ratio (1.5 to 6) and the mass fraction ratio (5 % to 20 %) between biomass and inert. The results showed that: for all the mixtures, U_{if} was characterized by the minimum fluidization velocity of the inert; for the mixture eucalyptus/inert, U_{af} , U_s e U_{cf} increased with the increase of mass fraction ratio and mean diameter ratio, while for the mixture *tucumã*/inert, the characteristic velocities slowly increased with the mass fraction ratio and mean diameter of biomass in the mixture; the segregation region increased with the mass fraction ratio for all the diameters, reaching the maximum of 2.4 and 1.6 for the eucalyptus and *tucumã*, respectively; for the mixture eucalyptus/inert, the ϵ_{af} and ϵ_{cf} were weakly influenced for mass fraction ratio below 20 %, due to the presence of pistons in the bed, and the expansion was more significant for smaller ratios of mass fractions and mean biomass diameter; for the mixture *tucumã*/inert, the ϵ_{af} and ϵ_{cf} , and the expansion were weakly influenced by these parameters. Effective mixture ranges were proposed according to: $1 < Re_{af} < 20$ and $1 < Re_{cf} < 37$, and $200 < Ar_m < 12500$. Empirical equations were proposed, by adjustment equations in power series and by Ergun equation in order to determine Re_{af} and Re_{cf} , with absolute relative errors of 25 % and 44 %, respectively.

Keywords: Biomass, Fluidized bed, Physical properties, Chemical properties, Thermal properties

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xx
NOMENCLATURA.....	xxii
Capítulo 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	2
Capítulo 2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 A biomassa como fonte de energia.....	3
2.2 A madeira de eucalipto.....	4
2.3 O resíduo de tucumã.....	6
2.4 Tecnologias de Conversão de Biomassas.....	6
2.4.1 Processos diretos de combustão	7
2.4.2 Gaseificação.....	7
2.4.3 Pirólise.....	8
2.5 Fluidização de biomassas	9
2.5.1 Fluidização de partículas homogêneas	10
2.5.1.1 Classificação de partículas	10
2.5.1.2 Regimes fluidodinâmicos.....	11
2.5.1.3 Determinação teórica da velocidade de mínima fluidização.....	13
2.5.2 Fluidização de partículas heterogêneas	15
2.5.2.1 Terminologias adotadas para misturas binárias	15
2.5.2.2 Estados fluidodinâmicos de partículas binárias	16
2.5.2.3 Correlações para a velocidade característica de misturas binárias.....	20
2.5.3 Fluidização de biomassas	20
2.5.3.1 Metodologias experimentais para a determinação das velocidades características	24
2.5.3.2 Influência da natureza da biomassa.....	26

2.5.3.3	Influência da razão de fração mássica entre biomassa e inerte	27
2.5.3.4	Influência do diâmetro do inerte, da biomassa e da variação de ambos	30
2.5.3.5	Correlações aplicadas para a análise das velocidades características	33
Capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODOS		35
3.1	Materiais sólidos escolhidos	35
3.2	Processo de moagem das biomassas	36
3.3	Amostragem	37
3.4	Parâmetros estatísticos de medida	37
3.5	Caracterização física	38
3.5.1	Distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas	38
3.5.2	Esfericidade	44
3.5.3	Massa específica aparente e real	47
3.5.3.1	Massa específica aparente	47
3.5.3.2	Massa específica real	49
3.5.4	Porosidade da partícula	50
3.5.5	Distribuição do diâmetro de poros	51
3.5.6	Análise morfológica	52
3.5.6.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	52
3.5.6.2	Microscopia de luz	52
3.6	Estudo do comportamento fluidodinâmico de partículas homogêneas e heterogêneas	53
3.6.1	Escolha dos intervalos granulométricos	53
3.6.2	Equipamento	54
3.6.3	Procedimento experimental	56
3.6.4	Metodologias utilizadas para a determinação de diferentes velocidades características	58
3.6.5	Expansão do leito e porosidades características de mistura	60
3.7	Análise química	62

3.7.1	Análise elementar CHN-S	62
3.7.2	Composição química	63
3.7.2.1	Determinação dos teores de e pectina, hemicelulose e celulose	63
3.7.2.2	Determinação do teor de lignina	66
3.8	Análises térmicas.....	67
3.8.1	Análise da decomposição térmica	67
3.8.2	Análise imediata das biomassas	68
3.8.2.1	Determinação do teor de umidade.....	68
3.8.2.2	Determinação do teor de cinzas	69
3.8.2.3	Determinação do teor de materiais voláteis	70
3.8.2.4	Determinação do teor de carbono fixo	71
3.8.3	Determinação do poder calorífico superior e inferior	71
Capítulo 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		75
4.1	Caracterização física dos sólidos.....	75
4.1.1	Análise morfológica das partículas de biomassa– MEV e microscópio de luz.....	76
4.2	Análise dos parâmetros fluidodinâmicos – partículas homogêneas	83
4.3	Análise dos parâmetros fluidodinâmicos - partículas heterogêneas.....	84
4.3.1	Influência da natureza da biomassa	87
4.3.2	Influência da razão da fração mássica entre biomassa e inerte	89
4.3.2.1	Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás	93
4.3.2.2	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão total em função da velocidade superficial do gás.....	98
4.3.3	Influência da razão de diâmetro médio entre biomassa e inerte.....	104
4.4	Análise comparativa com correlações da literatura.....	107
4.5	Proposta de faixas de operação para obtenção de misturas entre biomassa/inerte.	110
4.6	Elaboração de novas correlações.....	111
4.7	Porosidades aparentes e completas.....	115

4.8	Expansão dos leitos de misturas	115
4.9	Caracterizações Complementares.....	124
4.9.1	Caracterização química das biomassas.....	124
4.9.1.1	Análise elementar.....	124
4.9.1.2	Composição química.....	125
4.10	Caracterização térmica das biomassas	127
4.10.1	Análise da decomposição termogravimétrica.....	127
4.10.2	Análise imediata	129
4.10.3	Poder calorífico.....	130
	CONCLUSÃO.....	131
	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
	APÊNDICE A.....	143
	APÊNDICE B.....	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Oferta mundial de energia 2009 (Fonte: IEA, 2011)	3
Figura 2.2	Oferta interna de energia no Brasil para o ano de 2010 (Fonte: EPE, 2011).....	4
Figura 2.3	Consumo de madeira em tora de eucalipto e pinus por setor no ano de 2009 (Fonte: ABRAF, 2010).....	5
Figura 2.4	Plantação de eucalipto (Fonte: ABRAF, 2010)	5
Figura 2.5	Tucumã – Planta e Fruto (Fonte: LABPALM, 2010).....	6
Figura 2.6	Reatores de leito fluidizado (Fonte: GÓMEZ <i>et al.</i> , 2008)	9
Figura 2.7	Diagrama simplificado para a classificação de sólidos de acordo com seus comportamentos fluidodinâmicos (Fonte: GELDART, 1986).....	11
Figura 2.8	Tipos de pistões formados em leitos fluidizados: (a) Pistões simétricos (b) Pistões de parede (c) Pistão completo (Fonte: KUNII; LEVENSPIEL, 1991)	13
Figura 2.9	Efeitos dos estados de mistura e segregação em relação à queda de pressão com a velocidade superficial do gás e comportamento do leito associado: (a) completamente misturados, (b) completamente segregado, (c) parcialmente misturado. Fonte: Chiba <i>et al.</i> (1979).....	17
Figura 2.10	Queda de pressão em função da velocidade superficial do gás – velocidades características de fluidização inicial e final	19
Figura 2.11	Evolução das velocidades de fluidização inicial e final em função da fração mássica do componente emergível.....	19
Figura 2.12	Métodos para determinação de velocidades características aplicados à mistura casca de arroz/areia ($D = 5,5$, $\chi = 7,5\%$) por Oliveira e Tannous (2009).....	25
Figura 3.1	Amostras de eucalipto no formato de <i>chips</i>	35
Figura 3.2	Imagens do caroço do tucumã inteiro e seccionado.....	36
Figura 3.3	Areia quartzosa utilizada para os ensaios fluidodinâmicos.....	36
Figura 3.4	Moinho de martelo utilizado na moagem das biomassas.....	37
Figura 3.5	Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter da areia	39
Figura 3.6	Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter do eucalipto	40
Figura 3.7	Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter do tucumã.....	41

Figura 3.8	Imagens do eucalipto após o processo de moagem e peneiramento para os diâmetros escolhidos	42
Figura 3.9	Imagens do tucumã após o processo de moagem e peneiramento para os diâmetros escolhidos	42
Figura 3.10	Representação da partícula de eucalipto	45
Figura 3.11	Representação de uma partícula irregular - Caroço do fruto do tucumã e areia	45
Figura 3.12	Evolução do volume de intrusão acumulado de mercúrio em função do diâmetro de poros	51
Figura 3.13	Micrótomo utilizado para os cortes de biomassas	53
Figura 3.14	Classificação de materiais sólidos de acordo com o critério de Geldart (1986)	54
Figura 3.15	Esquema da montagem experimental utilizado (TANNOUS <i>et al.</i> , 2008).....	55
Figura 3.16	Estados fluidodinâmicos característicos de mistura binária: (a) Leito fixo; (b) Segregação total; (c) Segregação parcial e (d) Fluidização completa (mistura eucalipto/areia, $\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$, $\chi = 15\%$).....	57
Figura 3.17	Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás para leitos de partículas homogêneas e heterogêneas	59
Figura 3.18	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás para leitos de partículas homogêneas e heterogêneas	60
Figura 3.19	Evolução da altura do leito em função da velocidade superficial do gás.....	61
Figura 3.20	Expansão do leito em função da velocidade superficial do gás e representação das porosidades características – aparente e completa	62
Figura 4.1	MEV de amostras de partículas de eucalipto para os diâmetros médios de (a) 508,73 e (b) 986,67 μm	77
Figura 4.2	MEV da madeira de eucalipto (a) moída e (b, c, d) submetida a cortes em diferentes direções ($\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$)	78
Figura 4.3	Microscopia de luz de amostra da madeira de eucalipto.....	79
Figura 4.4	MEV de amostras de caroço do fruto do tucumã ($\bar{d}_b = 502,48 \mu\text{m}$, 250 X).	80
Figura 4.5	MEV do caroço do fruto do tucumã evidenciando esclereídes e pontoações	81
Figura 4.6	Microscopia de luz caroço do fruto do tucumã evidenciando (a) esclereídes e (b) esclerídes e lúmen.....	81

Figura 4.7	Imagens da superfície externa e interna do caroço do fruto do tucumã – material em pedaços	82
Figura 4.8	Imagens do comportamento fluidodinâmicos das misturas e suas velocidades características (a) Aparente (b) Segregação e (c) Completa	88
Figura 4.9	Imagens do comportamento fluidodinâmicos das misturas e suas velocidades características (a) Aparente (b) Segregação e (c) Completa	89
Figura 4.10	Evolução das velocidades características em função da razão da fração mássica.	92
Figura 4.11	Evolução da porosidade aparente e completa em função da razão da fração mássica	92
Figura 4.12	Evolução das velocidades características em função da razão da fração mássica .	92
Figura 4.13	Evolução da porosidade aparente e completa em função da razão da fração mássica	92
Figura 4.14	Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás .	94
Figura 4.15	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás.....	94
Figura 4.16	Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás ..	95
Figura 4.17	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás.....	95
Figura 4.18	Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás ..	96
Figura 4.19	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás.....	96
Figura 4.20	Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás ..	97
Figura 4.21	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás.....	97
Figura 4.22	Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de eucalipto	99
Figura 4.23	Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de tucumã.....	100
Figura 4.24	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de eucalipto	102

Figura 4.25	Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de tucumã .	103
Figura 4.26	Evolução das velocidades características com o diâmetro médio de eucalipto para diferentes frações	105
Figura 4.27	Evolução das velocidades características com o diâmetro de tucumã para diferentes frações.....	106
Figura 4.28	Comparação entre os valores das velocidades de fluidização aparente obtidas experimentalmente ($U_{fa,e}$) e por correlações da literatura ($U_{fa,t}$).....	108
Figura 4.29	Comparação entre os valores das velocidades de fluidização aparente obtidas experimentalmente ($U_{fa,e}$) e por correlações da literatura ($U_{fa,t}$).....	109
Figura 4.30	Número de Reynolds fluidização aparente em função do número de Arquimedes para diferentes misturas de biomassa e inerte	110
Figura 4.31	Número de Reynolds na fluidização completa em função do número de Arquimedes para diferentes misturas de biomassa e inerte	111
Figura 4.32	Comparação dos resultados experimentais e teóricos para o número de Reynolds na fluidização aparente calculado pelo método dos mínimos quadrados (a) e a partir da equação de Ergun (b).....	113
Figura 4.33	Comparação dos resultados experimentais e teóricos para o número de Reynolds na fluidização completa calculado pelo método dos mínimos quadrados (a) e a partir da equação de Ergun (b).....	114
Figura 4.34	Evolução da porosidade do leito em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de eucalipto.....	117
Figura 4.35	Evolução da porosidade do leito em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de caroço do fruto do tucumã..	118
Figura 4.36	Evolução da expansão do leito em função da velocidade superficial do gás para diferentes diâmetros médios de eucalipto na mistura	119
Figura 4.37	Evolução da expansão do leito em função da velocidade superficial do gás para diferentes diâmetros médios do caroço do fruto do tucumã	120
Figura 4.38	Comparativo de dados experimentais e teóricos pela equação de Tannous <i>et al.</i> (1994) aplicada a misturas biomassa/inerte ($D = 1,5$)	121

Figura 4.39	Comparativo de dados experimentais e teóricos pela equação de Tannous <i>et al.</i> (1994) aplicada a misturas biomassa/inerte (D = 3)	122
Figura 4.40	Comparativo de dados experimentais e teóricos pela equação de Tannous <i>et al.</i> (1994) aplicada a misturas biomassa/inerte (D = 6)	123
Figura 4.41	Curva de decomposição termogravimétrica para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã.....	128

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Características de alguns processos de pirólise	8
Tabela 2.2 Correções da literatura para o cálculo teórico de Re_{mf}	15
Tabela 2.3 Correlações empíricas propostas para misturas binárias de inertes.....	21
Tabela 2.4 Dados experimentais da literatura utilizados em estudos fluidodinâmicos de biomassa	22
Tabela 2.5 Equações utilizadas para o cálculo teórico das velocidades características de misturas (U_{fa} e U_{fc}).....	34
Tabela 3.1 Dados experimentais das propriedades físicas dos materiais sólidos.....	43
Tabela 3.2 Equações utilizadas para a determinação da esfericidade de acordo com o material sólido.....	46
Tabela 3.3 Dimensões lineares médias para diferentes diâmetros de Sauter	47
Tabela 3.4 Massa específica aparente dos sólidos.....	48
Tabela 3.5 Resultados obtidos nos ensaios de picnometria a gás.....	50
Tabela 4.1 Dados experimentais das propriedades físicas dos materiais sólidos.....	75
Tabela 4.2 Propriedades físicas e parâmetros fluidodinâmicos teóricos de partículas homogêneas	83
Tabela 4.3 Resultados experimentais e teóricos dos parâmetros fluidodinâmicos para partícula homogênea e mistura eucalipto/areia.....	85
Tabela 4.4 Resultados experimentais e teóricos dos parâmetros fluidodinâmicos para partícula homogênea e mistura tucumã/areia.....	86
Tabela 4.5 Comparativo entre Re_{fa} teórico e experimental (ERMA).....	107
Tabela 4.6 Correlações empíricas propostas aplicadas para misturas de biomassas.....	112
Tabela 4.7 Resultados da análise elementar para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã (b.s.)	124
Tabela 4.8 Análise elementar de diversas biomassas estudadas na literatura (base seca).....	125
Tabela 4.9 Composição química da parede celular das biomassas estudadas.....	126
Tabela 4.10 Composição química da parede celular de biomassas encontradas na literatura.....	126
Tabela 4.11 Zonas e temperaturas associadas à degradação das biomassas	128
Tabela 4.12 Resultados da análise imediata para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã.....	129

Tabela 4.13 Análise imediata e poder calorífico de biomassas da literatura (base seca)	129
Tabela 4.14 Poder calorífico superior e inferior das biomassas (base seca)	130

NOMENCLATURA

A	Absorbância	[-]
A_b	Absorvidade	[l/g cm]
a,b,c	Dimensões características das partículas	[cm]
A_c	Área da seção transversal da coluna	[m ²]
AS	Alíquota de solução	[μl]
A_{se}	Área da superfície da esfera	[m ²]
A_{sp}	Área da superfície da partícula	[m ²]
A_t	Área da seção transversal do leito	[m ²]
B	Comprimento da cubeta	[cm]
C	Teor de carbono	[%]
C_1 e C_2	Constantes definidas nas Equações 4.9 e 4.10	[-]
C_D	Coefficiente de arraste	[-]
C_l	Concentração de lignina	[%]
C_p	Concentração do polissacarídeo	[%]
CP	Poder calorífico do ácido benzóico padrão	[cal/g]
d	Fator de diluição da Equação 3.15	[-]
d_E	Diâmetro médio da particular emergível	[μm]
d_{ec}	Diâmetro da esfera circunscrita a uma partícula	[μm]
d_{ei}	Diâmetro de uma esfera inscrita a uma partícula	[μm]
d_p	Diâmetro da partícula	[μm]
\bar{d}_p	Diâmetro médio de Sauter da partícula	[μm]
$d_{p,ef}$	Diâmetro efetivo da partícula	[μm]
\bar{d}_{pi}	Diâmetro médio entre duas peneiras consecutivas	[μm]
$d_{p,i}$ e $d_{p,i+1}$	Diâmetros de peneira nos quais as partículas ficaram retidas em uma distribuição granulométrica	[μm]
$d_{p,I}$	Diâmetro médio da partícula imergível	[μm]
d_m	Diâmetro médio da mistura	[μm]
d_{poros}	Diâmetro médio dos poros das partículas	[μm]

D	Razão entre os diâmetros médios de Sauter da biomassa e inerte	[-]
D_c	Diâmetro da coluna	[m]
e_1	Correção para o calor de formação do ácido nítrico nas Equações 3.20 e 3.22	[cal]
e_2	Correção para o poder calorífico do fio de ignição nas Equações 3.20 e 3.22	[cal]
E	Equivalente em água do calorímetro	[cal/°C)
ERMA	Erro relativo médio absoluto	[%]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Teor de hidrogênio	[%]
H_{fa}	Altura do leito na velocidade de fluidização aparente	[m]
H_L	Altura média alcançada pelo leito	[m]
j	Constante da Equação 4.5	[-]
k	Constante da Equação 4.5	[-]
k'	Constante da equação definido na Tabela 2.5	[-]
K_1 e K_2	Constantes da equação 2.8	[-]
L_{mf}	Altura do leito na mínima fluidização	[m]
L_o	Altura do leito fixo	[m]
m_a	Massa de amostra	[g]
m_{ab}	Massa de ácido benzóico padrão da Equação 3.20	[g]
m_b	Massa de biomassa	[kg]
m_{bc}	Massa da biomassa e do cadinho	[g]
m_c	Massa do recipiente	[g]
m_{cinzas}	Massa de cinzas na amostra	[g]
m_{cont}	Massa do cadinho seco	[g]
m_f	Massa final	[g]
m_i	Massa de inerte	[kg]
m_m	Massa de mercúrio	[kg]
m_0	Massa inicial	[g]
m_{ps}	Massa do polissacarídeo	[μ g]
m_{pt}	Massa do penetrômetro	[g]

m_s	Massa do material seco	[g]
Δm	Variação da massa de biomassa pela análise termogravimétrica	[%]
MV	Teor de material volátil	[%]
n	Número total de amostras	[%]
N	Teor de nitrogênio	[%]
O	Teor de oxigênio	[%]
P_1	Pressão de enchimento da câmara de amostra do picnômetro	[psig]
P_2	Pressão após a abertura da válvula de expansão da bomba	[psig]
ΔP	Queda de pressão total do leito	[Pa]
r_1	Taxa de crescimento da temperatura durante os 5 min antes da ignição	[°C/min]
r_2	Taxa de variação da temperatura nos últimos 5 minutos	[°C/min]
R^2	Coefficiente de correlação	[-]
S	Desvio padrão	[-]
t_a	Tempo de ignição	[min]
t_b	Tempo no qual a temperatura alcançou 60% do total	[min]
t_c	Tempo no início do período no qual a variação de temperatura com o tempo torna-se constante	[min]
T	Elevação da temperatura corrigida n	[°C]
T_a	Temperatura no tempo “a” na Equação 3.21	[°C]
T_c	Temperatura no tempo “c” na Equação 3.21	[°C]
TC	Teor de carbono fixo	[%]
TCZ	Teor de cinzas	[%]
T_{endset}	Temperatura final de degradação de cada evento ocorrido na análise termogravimétrica	[°C]
$T_{\text{máx}}$	Temperatura de máxima taxa de perda de massa da análise termogravimétrica	[°C]
TMV	Teor de material volátil	[%]
T_{onset}	Temperatura inicial de degradação de cada evento ocorrido na análise termogravimétrica	[°C]
TS	Teor de enxofre	[%]

TU	Teor de umidade	[%]
U	Velocidade superficial do gás	[m/s]
U_{fa}	Velocidade de fluidização aparente	[m/s]
U_{fa_E}	Velocidade de fluidização aparente para a mistura eucalipto/inerte	[m/s]
U_{fa_T}	Velocidade de fluidização aparente para a mistura tucumã/inerte	[m/s]
$U_{fa,e}$	Velocidade de fluidização aparente experimental	[m/s]
$U_{fa,t}$	Velocidade de fluidização aparente teórica	[m/s]
U_{fc}	Velocidade de fluidização completa	[m/s]
$U_{fc,e}$	Velocidade de fluidização completa experimental	[m/s]
$U_{fc,t}$	Velocidade de fluidização completa teórica	[m/s]
U_{fc_E}	Velocidade da fluidização completa para a mistura eucalipto/inerte	[m/s]
U_{fc_T}	Velocidade da fluidização completa para a mistura tucumã/inerte	[m/s]
U_{fi}	Velocidade na fluidização inicial	[m/s]
U_{mf}	Velocidade na mínima de fluidização	[m/s]
$U_{mf,E}$	Velocidade mínima de fluidização da partícula emergível	[m/s]
$U_{mf,I}$	Velocidade mínima de fluidização da partícula imergível	[m/s]
$U_{mf,m}$	Velocidade mínima de fluidização da mistura	[m/s]
$U_{mf,M}$	Velocidade mínima de fluidização para um leito bem misturado	[m/s]
$U_{mf,MS}$	Velocidade mínima de fluidização para um leito entre o estado misturado e segregado	[m/s]
$U_{mf,S}$	Velocidade mínima de fluidização para um leito segregado	[m/s]
U_S	Velocidade de segregação	[m/s]
U_{S_E}	Velocidade de segregação para a mistura eucalipto/inerte	[m/s]
U_{S_T}	Velocidade de segregação para a mistura tucumã/inerte	[m/s]
U_t	Velocidade terminal	[m/s]
V_a	Volume da amostra	[m ³]
V_c	Volume da câmara de amostra	[m ³]
V_e	Volume da câmara de expansão	[m ³]
V_{ec}	Volume da esfera circunscrita ao sólido	[m ³]

V_m	Volume de mercúrio	[m ³]
V_{pt}	Volume do penetrômetro	[m ³]
V_s	Volume do sólido	[m ³]
VSF	Volume da solução final onde os polissacarídeos ficaram dissolvidos	[ml]
\bar{x}	Média amostral	[-]
x_i	Fração mássica das partículas i retidas entre duas peneiras consecutivas	[-]
x_e	Valor experimental	[-]
$x_{i,s}$	I-ésimo valor do parâmetro de referência	[-]
x_t	Valor teórico	[-]

Letras Gregas

ε	Expansão do leito determinada experimentalmente	[-]
ε_0	Porosidade de um leito fixo	[-]
ε_{fa}	Porosidade do leito na fluidização aparente	[-]
ε_{fc}	Porosidade do leito na fluidização completa	[-]
ε_t	Expansão do leito teórica	[-]
ε_{mf}	Porosidade do leito na condição de mínima fluidização	[-]
ε_p	Porosidade da partícula	[-]
φ_b	Esfericidade da biomassa	[-]
φ_i	Esfericidade do inerte	[-]
φ	Esfericidade da partícula	[-]
φ_C	Esfericidade segundo Curray (1951)	[-]
φ_{MP}	Esfericidade segundo Massarani e Peçanha (1986)	[-]
φ_R	Esfericidade segundo Riley (1941)	[-]
φ_W	Esfericidade segundo Wadell (1935)	[-]
μ_g	Viscosidade do gás	[kg/m ³]
ρ_{ef}	Massa específica aparente efetiva	[kg/m ³]
ρ_g	Massa específica do gás	[kg/m ³]

ρ_m	Massa específica aparente do mercúrio	[kg/m ³]
ρ_p	Massa específica aparente da partícula: razão entre a massa do sólido e o volume total da amostra, considerando o volume do sólido e dos poros do material.	[kg/m ³]
$\rho_{p,b}$	Massa específica aparente da biomassa	[kg/m ³]
$\rho_{p,E}$	Massa específica aparente das partículas emergíveis	[kg/m ³]
$\rho_{p,i}$	Massa específica aparente das partículas de inerte	[kg/m ³]
$\rho_{p,I}$	Massa específica aparente das partículas imergíveis	[kg/m ³]
$\rho_{p,m}$	Massa específica média da partícula na mistura	[kg/m ³]
ρ_s	Massa específica real: definida como a razão entre a massa e o volume do sólido	[kg/m ³]
σ	Desvio padrão das flutuações de pressão total	[Pa]
χ	Fração mássica de biomassa	[-]
χ_E	Fração mássica do componente emergível	[-]
χ_I	Fração mássica do componente imergível	[-]

Números Adimensionais

Ar	Número de Arquimedes	$Ar = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}$	[-]
Ar _m	Número de Arquimedes da mistura	$Ar_m = \frac{\bar{d}_m^3 \rho_g (\rho_{p,m} - \rho_g) g}{\mu_g^2}$	[-]
Mv	Número de massa específica segundo Thonglimp <i>et al.</i> (1984)	$Mv = \frac{\rho_{p,m} - \rho_g}{\rho_g}$	[-]
Re _{fa}	Número de Reynolds da partícula na velocidade de fluidização aparente	$Re_{fa} = \frac{\bar{d}_p U_{fa} \rho_g}{\mu_g}$	[-]

Número de Reynolds da partícula na velocidade de fluidização completa:

$$Re_{fc} = \frac{\bar{d}_p U_{fc} \rho_g}{\mu_g} \quad [-]$$

Re_p Número de Reynolds da partícula

$$Re_p = \frac{\bar{d}_p U \rho_g}{\mu_g} \quad [-]$$

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

$$Re_{p,mf} = \frac{\bar{d}_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad [-]$$

Abreviações

CP	Células parenquimáticas
DTG	Análise Termogravimétrica Derivativa
EV	Elementos de vaso
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
FCC	Catalisador de craqueamento catalítico
PVC	Cloreto de polivinila
tep	Tonelada equivalente de petróleo
TGA	Análise termogravimétrica

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de uma sociedade sustentável tem conduzido pesquisas e práticas que buscam a utilização de fontes renováveis de energia para substituir as fontes fósseis amplamente utilizadas nos últimos séculos, não renováveis e altamente poluidoras. Entre as alternativas disponíveis, podemos considerar o uso de biomassas. No Brasil, entre as inúmeras fontes, as provenientes de resíduos agrícolas e industriais desempenham papel importante na matriz energética.

Para conversão das biomassas disponíveis em energia, o uso da tecnologia de leitos fluidizados se destaca com inúmeras vantagens, como: transferência de calor elevada, temperaturas uniformes e controláveis, contato gás-sólido favorável e a possibilidade de utilização de partículas com propriedades bastante variadas (massa específica, esfericidade, diâmetro de partícula). No entanto, para que isso ocorra de forma efetiva, condições ideais de operação e escolha de materiais de forma cuidadosa devem ser feitas, a fim de que se encontrem condições ideais de mistura, contato gás/sólido favorável e elevada transferência de calor no leito. Entre os processos que utilizam a fluidização para a conversão de biomassa em energia, destacam-se a combustão em fornalhas de leito fluidizado, a pirólise e a gaseificação.

As biomassas não fluidizam facilmente devido a características como baixa esfericidade e massa específica aparente. Para garantir a fluidização desses materiais, utilizam-se inertes, como a areia, que atuam para a melhoria da transferência de calor no leito. A quantidade de inerte e a razão biomassa/inerte, além das dimensões dos materiais, influenciam fortemente a fluidização.

Sendo assim, este trabalho vem a complementar pesquisas feitas no Laboratório de Tecnologia de Partículas e Processos Multifásicos (LaProM/Feq/Unicamp) que estudam biomassas de diversas regiões do Brasil, como casca de arroz, jequitibá rosa, cana de açúcar e fibra de coco. O foco principal deste trabalho é avaliar as biomassas madeira de eucalipto (madeira de reflorestamento) e o caroço de tucumã (resíduo da agroindústria) em termos de suas propriedades fluidodinâmicas. Complementarmente, análises físicas, químicas e térmicas também foram realizadas. O eucalipto foi escolhido por apresentar grande relevância no contexto energético brasileiro, sendo produzido principalmente no sudeste do Brasil. O caroço do tucumã é um resíduo da agroindústria, que já vem sendo estudado para produção de carvão ativado e

briquetes. Apesar disso, não foram encontrados estudos sobre o uso destes materiais em leitos fluidizados ou sobre a fluidodinâmica dos mesmos.

1.1 Objetivos

Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a fluidodinâmica de partículas da madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e do caroço do fruto do tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), visando à utilização destas biomassas, misturadas a um inerte (areia), em processos de termoconversão que utilizem a tecnologia de leito fluidizado. De forma complementar foram avaliadas ainda as propriedades físicas, químicas e térmicas destas biomassas, sendo estes parâmetros importantes para o dimensionamento de equipamentos e melhor entendimento dos processos envolvidos em reatores termo - químicos destinados a produção de energia.

Objetivos específicos

- Caracterização física das biomassas madeira de eucalipto e caroço do fruto do tucumã e da areia, utilizada como inerte;
- Avaliação do comportamento de misturas binárias entre biomassas e inerte, com relação a diferentes razões de frações mássicas e diâmetros médios, utilizando como variáveis de resposta velocidades e porosidades características de mistura, obtidas pelos métodos de queda de pressão total, desvio padrão das flutuações de pressão total e expansão do leito;
- Proposta de modelos empíricos para a determinação das velocidades características de misturas binárias contendo biomassas;
- Caracterização química mediante análise elementar e composição química da parede celular das biomassas;
- Análise térmica das biomassas através de propriedades como poder calorífico superior e inferior, degradação térmica e análise imediata.

Capítulo 2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A biomassa como fonte de energia

A energia da biomassa tem sido utilizada desde que as pessoas começaram a queimar madeira para cozinhar alimentos ou manterem-se aquecidas. A madeira é ainda o maior recurso energético da atualidade, mas existem outras fontes, como culturas alimentares, plantas lenhosas, gramíneas, resíduos florestais ou agrícolas, algas ricas em óleo e compostos orgânicos de resíduos municipais e industriais. Estes recursos podem ser convertidos em combustíveis líquidos para transportes, gases ou líquidos para geração de eletricidade ou em compostos químicos, substituindo as fontes fósseis destinadas a estas finalidades (NREL – National Renewable Energy Laboratory, 2012).

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency-IEA*, 2011), no ano de 2009, o total mundial de energia em oferta foi de 12.150 Mtep (mega tonelada equivalente de petróleo), distribuídas conforme apresentado na Figura 2.1, sendo 10,2 % proveniente de biocombustíveis e resíduos. De acordo com o estudo, biocombustíveis são definidos como qualquer matéria usada diretamente como combustível ou convertida em outro combustível, calor ou eletricidade, como por exemplo: a madeira, resíduos vegetais, etanol e resíduos animais. Os resíduos municipais incluem resíduo domiciliar, comercial e de serviços públicos.

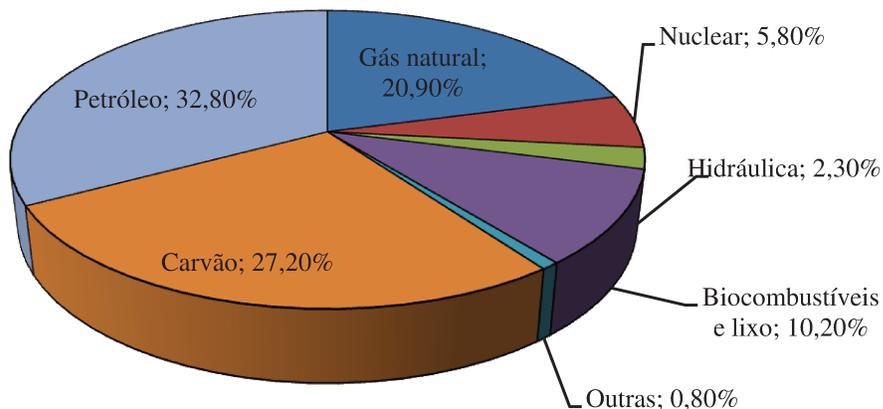


Figura 2.1 Oferta mundial de energia 2009 (Fonte: IEA, 2011)

Para o Brasil, no ano de 2010, a energia renovável, considerada a soma entre a energia hidráulica e eletricidade, lenha e carvão vegetal, produtos de cana-de-açúcar, entre outras, atingiu 45,5 % dos 268,75 milhões de tep de energia em oferta, distribuída de acordo com a Figura 2.2 (EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2011).

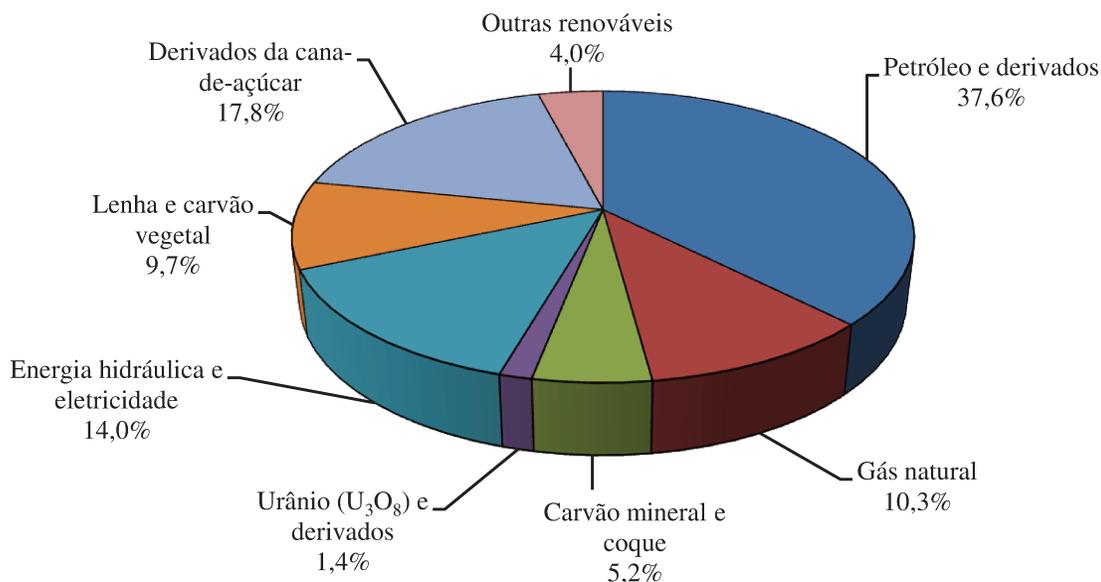


Figura 2.2 Oferta interna de energia no Brasil para o ano de 2010 (Fonte: EPE, 2011)

De acordo com o EPE (2011) em termos apenas de biomassas, o consumo energético para o ano de 2010 foi de 70,77 milhões de tep, sendo 24,1 % proveniente de lenha, 43,8 % de bagaço, 6,7 % lixívia, 6,6 % de carvão vegetal, 17 % de álcool etílico e 1,9 % de outras fontes.

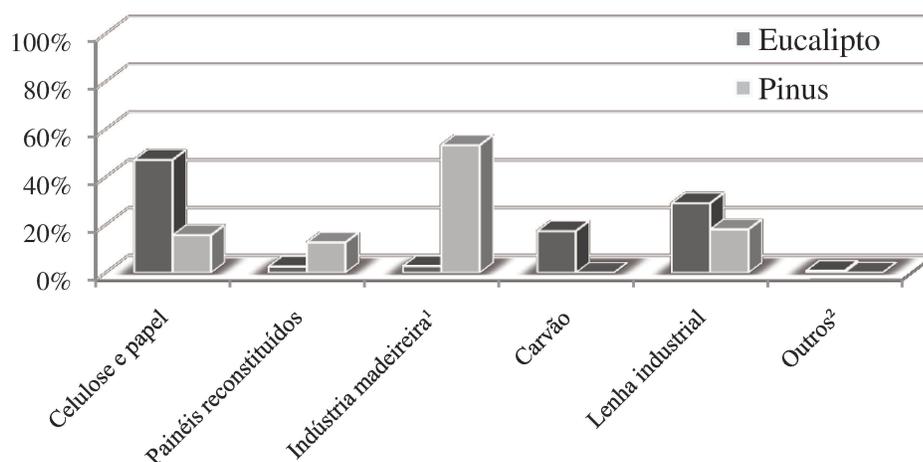
2.2 A madeira de eucalipto

De acordo com Couto e Müller (2008), o gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália e conta com mais de 700 espécies, sendo a mais utilizada em florestas plantadas com finalidades energéticas, devido à facilidade de adaptação no meio ambiente e alto índice de produtividade. As principais espécies de eucalipto utilizadas são: *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. urograndis* (híbrido), *E. camaldulensis*, *E. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. globulus*, *E. maculata*, *E. paniculata*, *E. pellita*, *E. pilularis*, *E. saligna* e *E. tereticornis*.

No ano de 2009, o Brasil somou 6.782.500 hectares de florestas plantadas, sendo este montante constituído por eucalipto (66,5 %), pinus (26,5 %) e 7 % de outras espécies comerciais, como acácia, pinheiro-do-Paraná, seringueira, teca e paricá. As plantações de eucalipto no Brasil

concentram-se nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Bahia, com 69 % da área plantada, enquanto a plantação de pinus concentra-se no Paraná e Santa Catarina (90 % da área plantada).

Na Figura 2.3, mostram-se os principais destinos das culturas de eucalipto e pinus, consumido em toras, para o ano de 2009, mostrando que o principal destino da madeira de eucalipto é a indústria de papel e celulose e como lenha industrial. A produção de pinus destina-se principalmente à indústria madeireira. Uma imagem ilustrativa da plantação de eucalipto é mostrada na Figura 2.4 (ABRAF, 2010).



¹ Inclui madeira serrada, compensado, e beneficiamento de produtos de maior valor agregado (pisos, portas, janelas, molduras, ferramentas etc); ² Inclui cavaco de madeira para exportação e madeira tratada.

Figura 2.3 Consumo de madeira em tora de eucalipto e pinus por setor no ano de 2009 (Fonte: ABRAF, 2010)



Figura 2.4 Plantação de eucalipto (Fonte: ABRAF, 2010)

2.3 O resíduo de tucumã

O tucumã é uma fruta típica da Amazônia, de sabor exótico e agradável, bastante presente na dieta de sua população. Além de servir de alimento, pode-se extrair um óleo de sua amêndoa para a produção de cosmético e biodiesel, com rendimento bastante elevado, chegando a 500 ml de óleo por quilo de amêndoa. No entanto, os caroços que envolvem estas amêndoas, são considerados resíduos (MANSUÊTO, 2008).

No trabalho de Cavalcanti *et al.* (2010), os autores avaliam o uso do que chamam de casca do tucumã, sendo este um resíduo da agroindústria de óleos essenciais, para a produção de carvão e, após prensagem, confecção de briquetes para uso energético. Avaliando o material, os pesquisadores encontraram elevada presença de carbono fixo (82,02 %), o que está diretamente relacionado ao poder calorífico do material (VALE *et al.*, 2004), tornando esta biomassa atrativa como matéria-prima para a produção de energia.

Na Figura 2.5a, há uma imagem da palmeira de onde se colhe o tucumã e na Figura 2.5b o tucumã é apresentado seccionado, mostrando o tegumento (parte amarelada, comestível), o caroço com a amêndoa e o fruto inteiro.



(a) Palmeira que produz o tucumã



(b) Fruto seccionado à esquerda e imagens do tucumã inteiro (à direita e ao centro)

Figura 2.5 Tucumã – Planta e Fruto (Fonte: LABPALM, 2010)

2.4 Tecnologias de Conversão de Biomassas

De acordo com Bauen *et al.* (2009), diferentes tecnologias de conversão de biomassas têm sido desenvolvidas, levando em conta as características físicas e composição química das

matérias-primas empregadas, bem como a finalidade a qual se destinam, como a produção de calor, eletricidade, líquido para transporte, entre outras. As rotas de conversão de biomassas estão divididas em: termoquímicas, onde a biomassa sofre degradação termoquímica, em processos como combustão, gaseificação, pirólise e torrefação; físico-químicas, onde se produzem combustíveis líquidos, através de oleaginosos como a soja e o pinhão-manso, dos quais se extrai óleo que é submetido a um processo de transesterificação; e a conversão biológica, que usa microorganismos como enzimas e bactérias para degradar a matéria-prima e produzir combustíveis líquidos e gasosos.

A tecnologia de leito fluidizado tem sido aplicada em processos como a gaseificação, a pirólise e combustão de uma grande variedade de materiais, incluindo biomassas. Como vantagens deste processo, destacam-se elevada transferência de calor, temperaturas uniformes e controláveis, contato fluido-sólido favorável e a facilidade de poder utilizar partículas de propriedades variadas (CUI; GRACE, 2007). Uma descrição destes processos que aplicam leitos fluidizados é descrita a seguir.

2.4.1 Processos diretos de combustão

A combustão é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio de reações entre os elementos constituintes da biomassa com o oxigênio (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005).

De acordo com Lora e Zampieri (2008), a característica fundamental de um combustor do tipo leito fluidizado é a versatilidade com relação ao tipo de combustível, conteúdo de umidade, cinzas e dimensões das partículas. A fase sólida do leito é constituída por um inerte (geralmente areia) e a biomassa, havendo alta intensidade de transferência de calor e massa em seu interior. A temperatura do leito nestes processos é de 810°C a 980°C.

2.4.2 Gaseificação

A gaseificação é definida como a conversão de qualquer combustível sólido em um gás energético, pela oxidação parcial a temperaturas elevadas (800°C - 1000°C), podendo ser operado em vários tipos de reatores, de leito fixo ou fluidizado. Em geral, a gaseificação apresenta-se bastante promissora, pois possibilita o uso de diversos combustíveis de difícil fluidização, devido a características relacionadas à umidade, granulometria e massa específica. Como exemplos, citam-se a cana-de-açúcar e a casca de arroz (BEHAINNE, SÁNCHEZ, 2010).

De acordo com Lora *et al.* (2008), o gás resultante do processo de gaseificação tem várias aplicações práticas, como a combustão em motores alternativos de combustão interna e turbinas a gás, para geração de energia mecânica e elétrica, geração direta de calor ou como matéria-prima na obtenção de combustíveis líquidos. De acordo com os autores, de maneira geral, quando produzido eletricidade ou calor, o processo de gaseificação deve competir, técnica e economicamente, com a combustão direta da biomassa, combustíveis fósseis ou outros combustíveis alternativos.

2.4.3 Pirólise

A pirólise é a decomposição térmica de biomassas, em ausência de ar, utilizada na produção de diversos produtos sólidos, líquidos e/ou gasosos, ocorrendo tipicamente em uma faixa de temperatura entre 300°C e 650°C. De acordo com a taxa de aquecimento, pode-se classificar a pirólise como rápida ou lenta. A pirólise é lenta (tempo de residência na ordem de minutos), quando o tempo requerido para aquecer o combustível para a temperatura de pirólise é maior do que o tempo característico de reação da pirólise, e rápida (tempo de residência na ordem de segundos) quando ocorre o inverso. De acordo com as condições operacionais, outras variações podem ocorrer, como mostrado na Tabela 2.1 (BASU, 2010):

Tabela 2.1 Características de alguns processos de pirólise

Processo de pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura final (°C)	Produtos
Carbonização Convencional	Dias 5 - 30 min	Muito lenta Lenta	400 600	Carvão vegetal Carvão, produtos líquidos e gasosos
Rápida	< 2 s	Alta	~ 500	Líquidos
<i>Flash</i>	< 1 s	Muito alta	< 650	Produtos líquidos e gasosos
Ultra-rápida	< 0,5 s	Muito alta	~1000	Produtos líquidos e gasosos
Vácuo	2-30 s	Média	400	Produtos líquidos
Hidropirólise	< 10s	Alta	< 500	Produtos líquidos
Metanopirólise	< 10s	Alta	> 7 00	Produtos líquidos

Fonte: Basu, 2010

Ainda de acordo com Basu (2010) o uso de reator de leito fixo é o mais antigo em processo de pirólise e, junto aos leitos fluidizados borbulhantes e circulantes, são os mais utilizados atualmente.

De acordo com Gómez *et al.* (2008), para a realização da pirólise rápida, o uso de reatores de leito fluidizado em regime borbulhante (Figura 2.6a) e circulante (Figura 2.6b) estão entre as principais condições escolhidas para a pirólise, sendo o mais comumente sugerido para materiais lignocelulósicos, os reatores de leito fluidizado borbulhante.

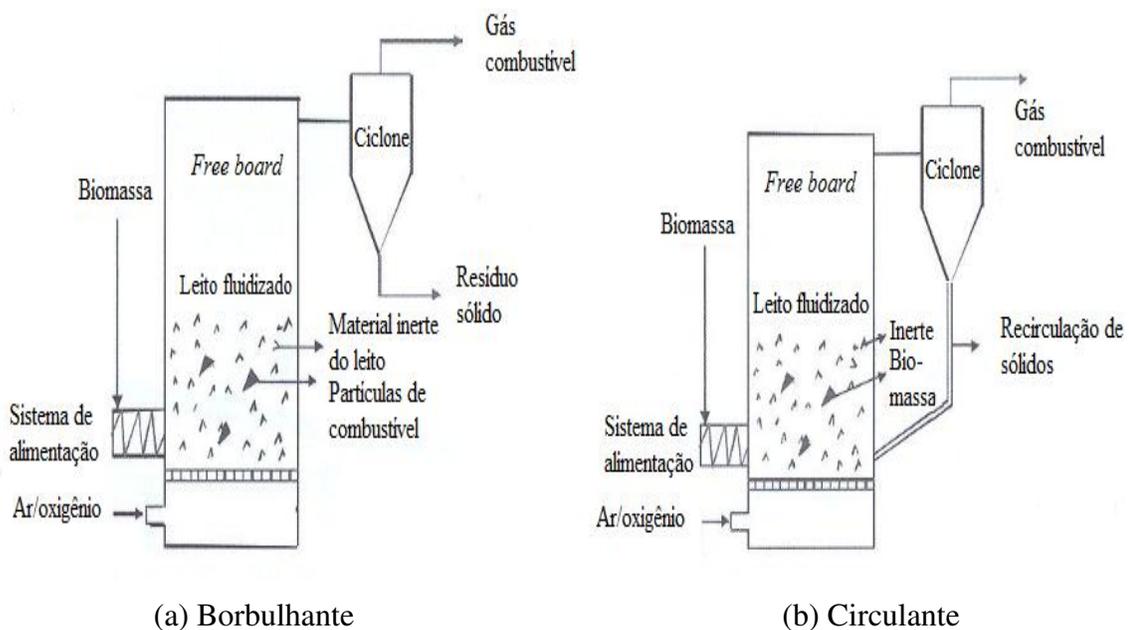


Figura 2.6 Reatores de leito fluidizado (Fonte: GÓMEZ *et al.*, 2008)

2.5 Fluidização de biomassas

De acordo com Cui e Grace (2007), apesar do esforço no desenvolvimento de equipamentos para conversão de biomassas em energia que empregam leitos fluidizados, poucos autores têm tentado entender os mecanismos de fluidização de biomassas, ou misturas de biomassas e inertes (mais frequentemente partículas de areia) e investigado propriedades que poderiam resolver problemas relacionados à fluidodinâmica dessas partículas. Geralmente, é assumido que o projeto e a operação de equipamentos envolvendo biomassas podem ser baseados no conhecimento convencional de fluidização e suas metodologias. Entretanto, as propriedades relacionadas a biomassas são diferenciadas, com relação a propriedades como o diâmetro de

partícula, a forma e a umidade presente nestes materiais, fazendo com que seu comportamento seja subestimado.

Como observado em diversos trabalhos (TANNOUS; MIZONOV, 2009; RAO; REDDY, 2010), biomassas não fluidizam ou fluidizam com baixa qualidade sem a presença de um inerte. Sendo assim, os leitos que operam com biomassas são compostos de misturas heterogêneas de partículas (biomassa e inerte). De qualquer forma, uma revisão tanto de partículas homogêneas quanto heterogêneas será realizada, a fim de se discutir suas particularidades.

2.5.1 Fluidização de partículas homogêneas

2.5.1.1 Classificação de partículas

Geldart (1973, 1986) classificou as partículas homogêneas em quatro grupos, de acordo com seus diâmetros e massas específicas aparentes, para condições ambientes de temperatura e pressão (Figura 2.7):

- Grupo A: partículas finas, coesivas e aeráveis, com baixa massa específica (menor que 1400 kg/m^3). Leitos expandem-se consideravelmente antes da formação de bolhas. Com o aumento da velocidade superficial do gás, podem formar pistões axiais. Ex: catalisadores;
- Grupo B: materiais com diâmetros médios de partícula entre $40 \text{ }\mu\text{m}$ e $500 \text{ }\mu\text{m}$, e massas específicas entre 1400 kg/m^3 e 4000 kg/m^3 . Bolhas começam a ser formadas em velocidades ligeiramente acima da velocidade de mínima fluidização. A expansão do leito é pequena e, para altas velocidades de gás, pistões são inicialmente simétricos e tornam-se pistões de parede com ligeiro aumento da velocidade. Ex.: areia;
- Grupo C: partículas coesivas, geralmente com diâmetro menor do que $20 \text{ }\mu\text{m}$. Estes materiais são de difícil fluidização, proporcionando baixa mistura, pois as forças entre as partículas são mais fortes que a do fluido sobre essas. Ex.: cimento;
- Grupo D: Partículas grandes e densas, com vazios horizontais próximos ao distribuidor. Em colunas estreitas estes vazios podem se estender através do leito e formar pistões que crescem e colapsam na superfície. Ex.: grãos de café.

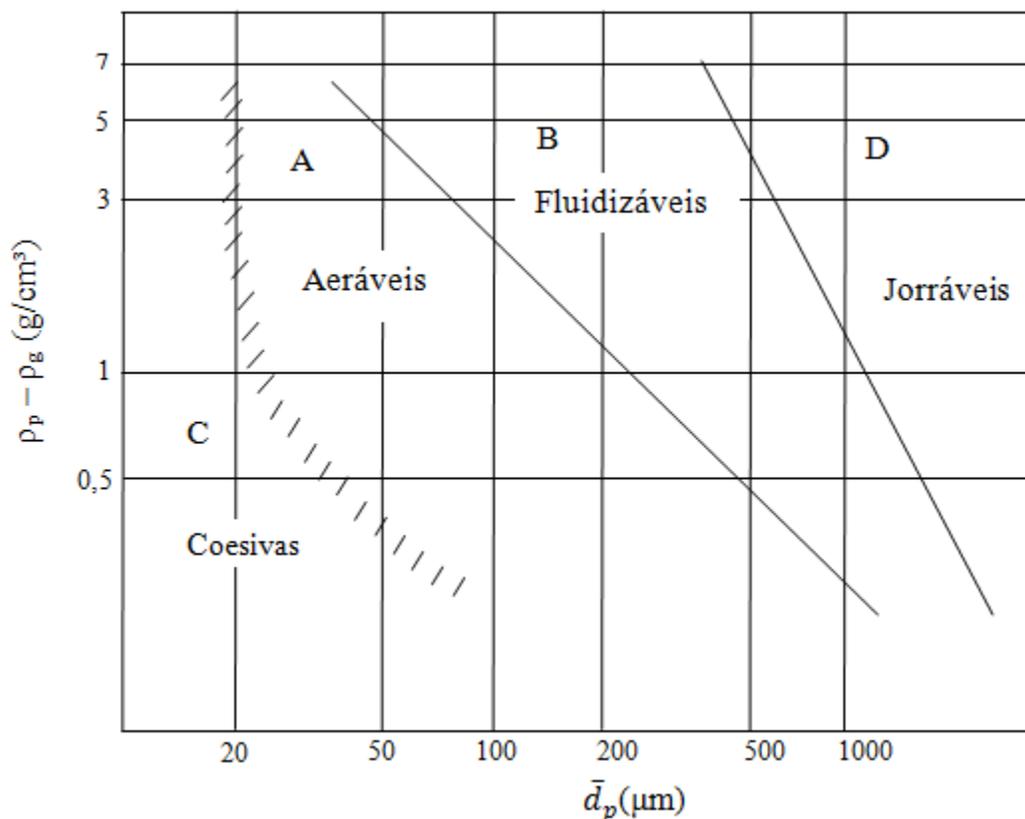


Figura 2.7 Diagrama simplificado para a classificação de sólidos de acordo com seus comportamentos fluidodinâmicos (Fonte: GELDART, 1986)

2.5.1.2 Regimes fluidodinâmicos

A fluidização é uma operação unitária na qual partículas sólidas são suspensas mediante a presença de um gás ou um líquido. À medida que a velocidade superficial de um gás é aumentada através de um leito de partículas, diferentes formas de contato podem se manifestar: leito fixo, incipiente, borbulhante, pistão, turbulento e transporte pneumático (KUNII; LEVENSPIEL, 1991):

Leito fixo: ocorre a baixas velocidades superficiais do gás, quando este apenas percola as partículas pelos espaços vazios;

Leito fluidizado incipiente: o leito deixa de ser fixo e torna-se fluidizado, ocorrendo à suspensão das partículas, pois a força de arraste torna-se igual ao peso aparente do leito de partículas. Neste ponto defini-se a velocidade de mínima fluidização (U_{mf});

Leito fluidizado borbulhante: aumentando a velocidade superficial do gás no leito, alcança-se o regime de bolhas. Segundo Yang (2003), para partículas do grupo B e D da classificação de Geldart, o leito passa de leito fixo para borbulhante na velocidade de mínima fluidização (U_{mf}). Para partículas do grupo A, bolhas não serão observadas nesta velocidade, pois o leito expande homogeneamente, surgindo somente quando atingir o mínimo borbulhamento.

De acordo com Clift (1986), partículas do grupo A de Geldart (1973, 1986) apresentam diâmetro de bolhas pequeno no leito, sendo este dependente do diâmetro da partícula. Comparativamente a este grupo, as partículas do grupo B apresentam diâmetro de bolha maior, e menos dependente do diâmetro das partículas no leito. De acordo com Cranfield e Geldart (1974), em leitos com partículas do grupo D, as bolhas são agrupadas na horizontal, formando pistões que podem atingir o diâmetro da coluna.

Há definições clássicas a respeito dos tipos de bolhas associadas aos tipos de partículas presentes em um leito. Fitzgerald (1985) classificou as bolhas em rápidas e lentas. A bolha rápida ocorre quando sua velocidade é maior que a velocidade intersticial do gás e está presente em um leito de partículas finas (menores que 500 μm), enquanto que a bolha lenta ocorre para velocidade de bolha menor que a do gás intersticial, e está presente em leitos com partículas grandes (maiores que 1000 μm).

De acordo com Yang (2003), quando bolhas alcançam aproximadamente 2/3 do diâmetro da coluna, o leito entra em um regime de pistões.

Leito fluidizado empistonado: Em um leito fluidizado estreito e de elevada altura, as bolhas formadas no distribuidor podem crescer e alcançar um diâmetro comparável ao diâmetro da coluna, o que é chamado de pistão. Para partículas finas, os pistões são da forma da Figura 2.8a, chamados de pistões simétricos (axiais). Para maiores velocidades do gás e partículas angulares (irregulares) ou paredes de leito rugosas, estes pistões tendem a aderir à parede, formando pistões de parede, como mostrado na Figura 2.8b. Quando partículas do grupo D são fluidizadas, o leito é caracterizado por uma alternância de fases densas e diluídas separadas por interfaces horizontais através das quais as partículas caem em formato de chuva, conforme representado pela Figura 2.8c (CLIFT; GRACE, 1985; KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

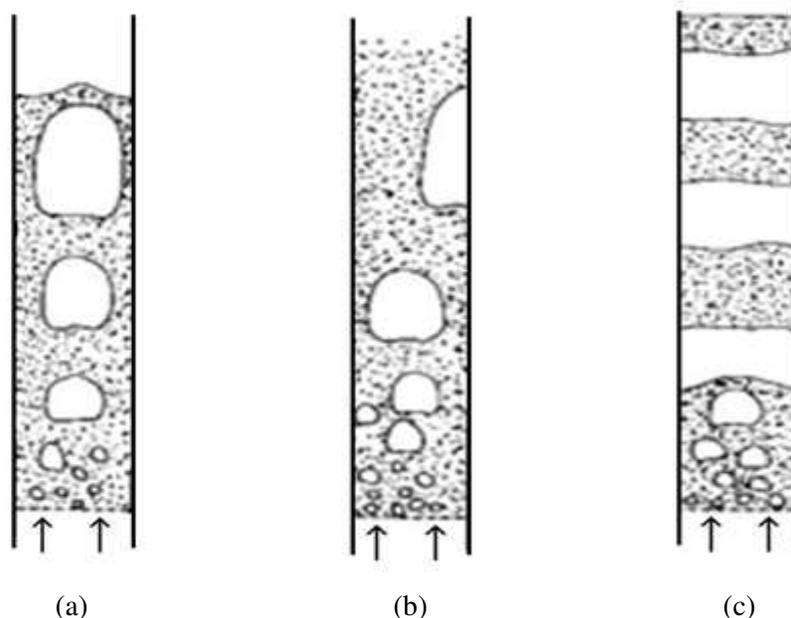


Figura 2.8 Tipos de pistões formados em leitos fluidizados: (a) Pistões simétricos (b) Pistões de parede (c) Pistão completo (Fonte: KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

Leito fluidizado turbulento: quando partículas finas são fluidizadas a velocidades suficientemente altas, ocorre, ao invés de bolhas, uma movimentação caótica dos sólidos e vazios de gás intersticial de diversos diâmetros e formas.

Leito em transporte pneumático: sólidos são arrastados do leito mediante o aumento da velocidade superficial do gás.

2.5.1.3 Determinação teórica da velocidade de mínima fluidização

A determinação teórica da U_{mf} parte de um balanço de forças, para o ponto onde a queda de pressão do leito iguala o peso do fluido e das partículas, de acordo com a Equação 2.1 (KUNII; LEVENSPIEL, 1991):

$$\Delta P A_t = A_t L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) [(\rho_p - \rho_g)g] \quad (2.1)$$

ou:

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (2.2)$$

onde ΔP é a queda de pressão no leito, A_t a área da seção transversal do leito, L_{mf} e ε_{mf} a altura e porosidade do leito na mínima fluidização, ρ_p e ρ_g as massas específicas do sólido e do gás, e g a aceleração da gravidade.

A velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) é obtida pela combinação da Equação 2.2 com a extrapolação da expressão de leito fixo estabelecida por Ergun (1952), conforme Equação 2.3:

$$\frac{\Delta P}{L_0} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \frac{\mu_g U}{(\varphi \bar{d}_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} \frac{\rho_g U^2}{\varphi \bar{d}_p} \quad (2.3)$$

resultando na Equação 2.4:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi} \left(\frac{\bar{d}_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi^2} \left(\frac{\bar{d}_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right) = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (2.4)$$

sendo L_0 e ε_0 a altura e a porosidade do leito fixo, φ a esfericidade do sólido, e \bar{d}_p o diâmetro médio da partícula, μ_g , a viscosidade do gás e U , a velocidade superficial do gás, respectivamente.

Utilizando os números adimensionais de Reynolds na mínima fluidização (Re_{mf}), descrito na Equação 2.5, e número de Arquimedes (Ar), na Equação 2.6, a Equação 2.4 pode ser escrita na forma da Equação 2.7:

$$Re_{p,mf} = \frac{\bar{d}_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (2.5)$$

$$Ar = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (2.6)$$

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi^2} Re_{p,mf} = Ar \quad (2.7)$$

Representando os termos que multiplicam o número de Reynolds na mínima fluidização por K_1 (Equação 2.9) e K_2 (Equação 2.10), pode-se simplificar ainda mais sua representação pela Equação 2.8:

$$K_1 Re_{p,mf}^2 + K_2 Re_{p,mf} = Ar \quad (2.8)$$

onde:

$$K_1 = \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi} \quad (2.9)$$

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi^2} \quad (2.10)$$

Ainda de acordo com Kunii e Levenspiel (1991), os autores Wen e Yu (1966) foram os primeiros a notar que K_1 e K_2 permanecem praticamente constantes para diferentes tipos de partículas e condições. Os autores chegaram a esta conclusão através da análise de 134 pontos de dados da literatura ($0,0508 \text{ mm} < \bar{d}_p < 50,038 \text{ mm}$; $0,136 < \varphi < 1$) e então propuseram uma correlação para prever teoricamente o valor de U_{mf} (Equação 2.11), para o número de Reynolds de 0,001 a 4000. A partir de então, diversos autores tem criado correlações a partir de dados experimentais para obtenção dos valores destas constantes, evitando a determinação de φ e ε_{mf} , como mostrado na Tabela 2.2.

$$Re_{mf} = (33,70^2 + 0,0408Ar)^{1/2} - 33,70 \quad (2.11)$$

Tabela 2.2 Correções da literatura para o cálculo teórico de Re_{mf}

Autores	$K_2/2K_1$	$1/K_1$
Wen e Yu (1966)	33,7	0,0408
Babu <i>et al.</i> (1978)	25,3	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408
Tannous <i>et al.</i> (1994)	25,83	0,0430

2.5.2 Fluidização de partículas heterogêneas

2.5.2.1 Terminologias adotadas para misturas binárias

Para caracterizar misturas binárias, Rowe e Nienow (1976) propuseram uma terminologia baseada nas principais propriedades dos elementos de uma mistura. Quando misturas binárias são

fluidizadas, cada partícula poderá ser definida de acordo com sua massa específica, diâmetro médio e velocidade de mínima fluidização da seguinte forma:

- massa específica: pesadas e leves
- diâmetro médio: grande e pequena
- velocidade de mínima fluidização: empacotada e fluida. Define-se como partículas empacotadas, aquelas que fluidizam acima da velocidade mínima de fluidização da mistura, e fluidas, as que fluidizam a velocidades menores que a de mínima fluidização da mistura.

Para Chiba *et al.* (1979), em uma mistura binária faz-se a distinção entre estes usando a terminologia de emergível e imergível. Quando há uma diferença na massa específica, o componente mais pesado tenderá a imergir, enquanto o mais leve, a emergir. Quando não houver uma diferença de massa específica, será levado em conta o diâmetro das partículas, sendo a menor a emergível e a maior a imergível.

2.5.2.2 Estados fluidodinâmicos de partículas binárias

Conceitos tradicionais de misturas de partículas heterogêneas foram definidos por Chiba *et al.* (1979), usando misturas binárias de materiais inertes (cobre, carbono, vidro, sílica), com diferentes diâmetros (115 μm a 775 μm) e massas específicas (190 kg/m^3 a 8900 kg/m^3), para as quais estados típicos de mistura e segregação foram determinados. Os experimentos foram conduzidos em leitos cilíndricos de 50 mm e 100 mm de diâmetro interno, utilizando ar como agente fluidizante. Partindo de um leito bem misturado a velocidade decrescente de gás, os autores definiram que os leitos podem apresentar três estados:

(a) completamente misturados, para sistemas com pequena diferença de diâmetro (menor que $\sqrt{2}$) e mesma massa específica;

(b) completamente segregados, quando um dos componentes apresenta maior massa específica e diâmetro, estando a partícula emergível no topo e a imergível na base do leito;

(c) parcialmente misturado, como na maioria dos casos, onde há um equilíbrio intermediário entre mistura e segregação no meio do leito, onde partículas emergíveis e imergíveis ocupam o topo e a base do mesmo, respectivamente.

Para cada estado, foi definida uma velocidade mínima de fluidização, de acordo com a mesma metodologia proposta para partículas homogêneas. O comportamento da queda de pressão

em função da velocidade do gás, e identificação das velocidades mínimas de fluidização associadas à partícula imergível ($U_{mf,I}$) e emergível ($U_{mf,E}$), para um leito bem misturado ($U_{mf,M}$), segregado ($U_{mf,S}$) e em uma região intermediária a estes ($U_{mf,MS}$) estão descritas na Figura 2.9, bem como os arranjos característicos das partículas.

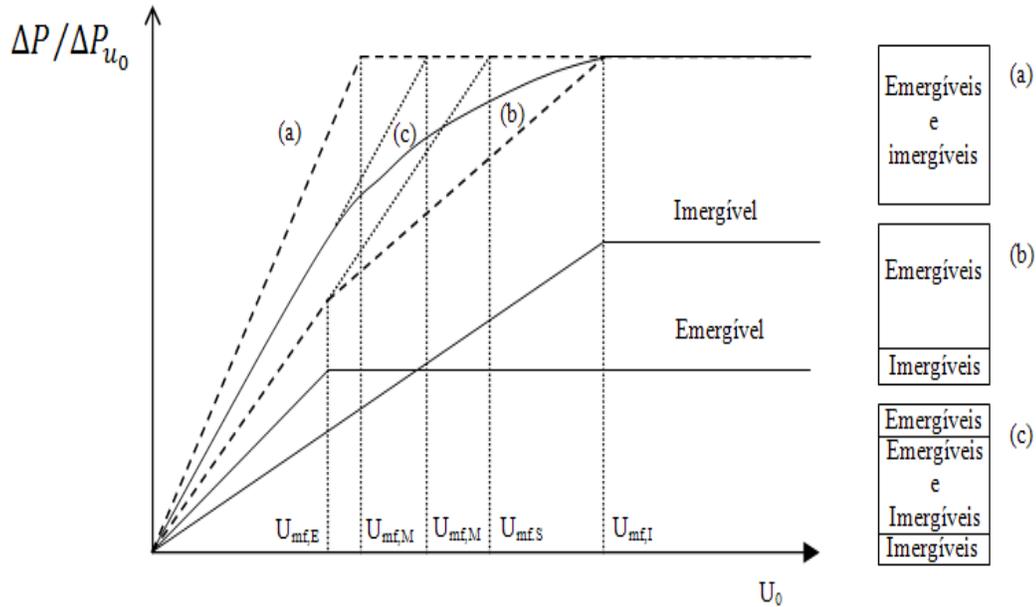


Figura 2.9 Efeitos dos estados de mistura e segregação em relação à queda de pressão com a velocidade superficial do gás e comportamento do leito associado: (a) completamente misturados, (b) completamente segregado, (c) parcialmente misturado. Fonte: Chiba *et al.* (1979)

A mesma metodologia e definição de $U_{mf,M}$ também foram utilizadas por Thonglimp *et al.* (1984), para misturas de inertes (vidro, aço e alumina), com diferentes massas específicas (1607 kg/m^3 - 7425 kg/m^3), diâmetros médios ($112 \mu\text{m}$ - $2125 \mu\text{m}$) e diâmetros de leitos ($0,05 \text{ m}$ - $0,434 \text{ m}$), e por Formisani (1991), para misturas de esferas de vidro (2530 kg/m^3), com diferentes diâmetros de partículas ($153 \mu\text{m}$ - $483 \mu\text{m}$), em leitos de $0,101 \text{ m}$ de diâmetro.

Mourad *et al.* (1994) avaliou o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias de milho ($\rho_p = 1200 \text{ kg/m}^3$) com granulometria de $250 \mu\text{m}$ - $315 \mu\text{m}$ e areia ($\rho_p = 2650 \text{ kg/m}^3$) com granulometria entre $6300 \mu\text{m}$ e $8000 \mu\text{m}$. Os autores observaram a existência de mais de uma velocidade característica de mistura, as quais foram definidas da seguinte forma:

- Velocidade de fluidização inicial (U_{fi}): corresponde ao desaparecimento completo das flutuações da queda de pressão, com a queda de pressão aumentando linearmente com a velocidade superficial do gás;
- Velocidade de fluidização aparente (U_{fa}): é definida pela intersecção entre o leito fixo e fluidizado, como adotado para partículas homogêneas, mas caracterizado pelos estados de segregação total e parcial;
- Velocidade de fluidização completa (U_{fc}): é a velocidade a partir do qual a queda de pressão é constante com o aumento da velocidade superficial do gás. Nesta velocidade todas as partículas de uma mistura estão fluidizadas.

De acordo com os autores, estas velocidades definem diferentes estados fluidodinâmicos de mistura no leito, sendo estes:

- Leito fixo ($U \leq U_{fi}$): limite para o qual não há movimentação de partículas no leito;
- Segregado total ($U_{fi} \leq U \leq U_{fa}$): o leito encontra-se dividido, com partículas de milho em estado fixo na base do leito e partículas de areia em estado fluidizado na parte superior;
- Segregado parcial ($U_{fa} \leq U \leq U_{fc}$): a partir da velocidade de fluidização aparente a queda de pressão promove a flotação parcial do milho no leito,
- Fluidização completa ($U \geq U_{fc}$): fluidização completa de todos os componentes da mistura

Formisani *et al.* (2007) analisaram os efeitos da razão de massa específica sobre leitos fluidizados formados por misturas binárias de inertes. As misturas foram avaliadas com razões de massa específica variadas de 1,45 a 3,01 e frações mássicas entre os componentes emergíveis e imergíveis no leito (χ_E) de 0 a 100%. As razões de diâmetros foram aproximadamente iguais ($0,95 < \bar{d}_p < 1,06$). Os inertes utilizados foram peneiras moleculares ($\bar{d}_p = 624 \mu\text{m}$, $\rho_p = 1460 \text{ kg/m}^3$) esferas de vidro ($\bar{d}_p = 223 \mu\text{m}$, $428 \mu\text{m}$, $593 \mu\text{m}$ e $661 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2480 \text{ kg/m}^3$), cerâmica ($\bar{d}_p = 701 \mu\text{m}$, $\rho_p = 3600 \text{ kg/m}^3$) e aço ($\bar{d}_p = 249 \mu\text{m}$ e $439 \mu\text{m}$, $\rho_p = 7700 \text{ kg/m}^3$). Os experimentos foram realizados em uma coluna de 10 cm (DI).

Os autores definiram duas velocidades características de mistura, similarmente definidas por Mourad *et al.* (1984), sendo estas: velocidade de fluidização inicial (U_{fi}), determinada no ponto onde a queda de pressão desvia da linha do leito fixo; e a velocidade de fluidização final (U_{ff}), definida no primeiro valor de queda de pressão constante (Figura 2.10), para a mistura contendo 30 % de esfera de aço ($\bar{d}_p = 249 \mu\text{m}$), componente imergível, e 70 % de esferas de vidro ($\bar{d}_p = 223 \mu\text{m}$), componente emergível.

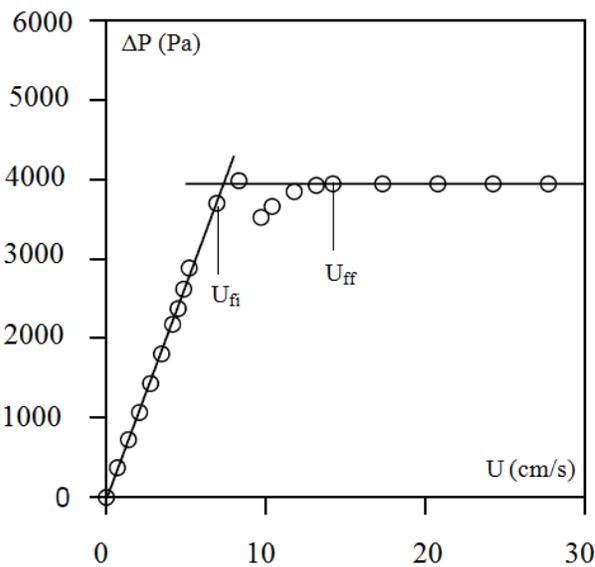


Figura 2.10 Queda de pressão em função da velocidade superficial do gás – velocidades características de fluidização inicial e final

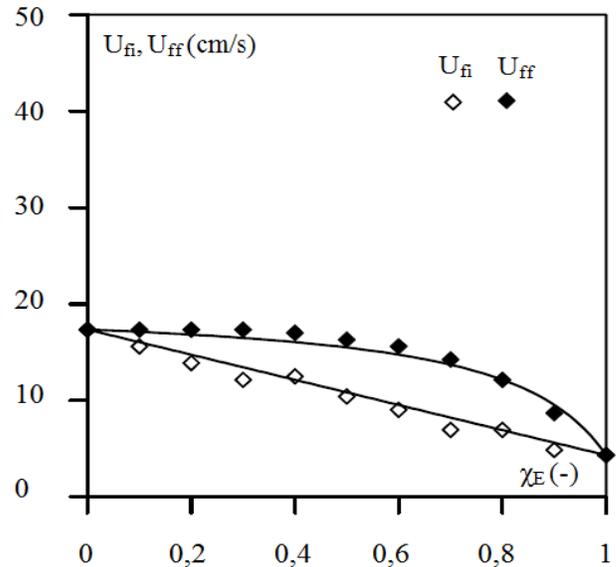


Figura 2.11 Evolução das velocidades de fluidização inicial e final em função da fração mássica do componente emergível

Mistura entre esferas de aço ($\chi_I = 30\%$) e de vidro ($\chi_E = 70\%$) (Fonte: FORMISANI *et al.*, 2007)

A influência da massa específica foi avaliada através do perfil de concentração axial do componente emergível nas misturas, bem como o intervalo de segregação entre U_{ff} e U_{fi} , ao qual os autores chamaram de amplitude do intervalo de fluidização. Este intervalo ($U_{ff} - U_{fi}$) não foi apenas uma função da composição da mistura, mas sim da forma como estas partículas estavam arranjadas ou acomodadas no leito. Os autores concluíram que o aumento da razão de massa específica provocou o aumento da segregação entre as partículas, bem como definiu a velocidade em que os sólidos são levados ao estado misturado (U_{ff}).

Formisani *et al.* (2007) observaram ainda que as formas das curvas das velocidades características (U_{fi} e U_{ff}), em função da fração mássica dos componentes emergíveis, apresentaram o mesmo comportamento para todas as misturas propostas, com formato de um triângulo curvado, como exemplificado na Figura 2.11.

2.5.2.3 Correlações para a velocidade característica de misturas binárias

Diferentes correlações foram propostas para misturas binárias, como mostradas na Tabela 2.3. Goossens (1971) definiu valores médios de diâmetro e massas específicas, a serem substituídos na equação de Wen e Yu (1966) desenvolvida para partículas homogêneas, sendo esta definição também aplicada por Thonglimp *et al.* (1984) e Mourad *et al.* (1994).

Vale ressaltar que Thonglimp *et al.* (1984) elaborou duas correlações para a determinação de Re_{fa} . A primeira enunciada Tabela 2.3, foi obtida a partir da Equação 2.3, de Ergun (1952), por ajuste através de regressão linear múltipla (mais de uma variável independente) dos dados experimentais. Neste caso, os coeficientes a serem determinados foram K_1 e K_2 , conforme Equações 2.9 e 2.10. A segunda equação enunciada é válida para $Re_p < 20$, sendo também obtida pelo método de regressão linear múltipla, considerando como coeficientes os valores de A ($A = 3,4 \times 10^{-3}$), i ($i = 0,9$) e j ($j = -0,1$), definindo a Equação conforme apresentada na Tabela 2.3.

Otero e Corella (1971) calcularam a velocidade de fluidização aparente de acordo com a média ponderada das velocidades dos componentes emergíveis (E) e imergíveis (I) presentes na mistura.

Chiba *et al.* (1979) definiram a velocidade de fluidização aparente de mistura utilizando as velocidades de mínima fluidização das partículas emergíveis (E) e imergíveis (I), e valores da fração de emergível na mistura (χ_E).

2.5.3 Fluidização de biomassas

Há diversos estudos na literatura a respeito do uso de biomassas em leito fluidizado, nos quais são avaliadas diferentes propriedades, como natureza do inerte, ou a ausência deste, a fração mássica de biomassa, diâmetro e massa específica de biomassa e inerte e a geometria do leito, através de diferentes metodologias. Alguns trabalhos da literatura foram selecionados e estão listados na Tabela 2.4.

O principal objetivo destes estudos foi avaliar as velocidades características das misturas entre biomassas e inertes e a qualidade destas misturas. Uma análise das metodologias e velocidades características empregadas por estes autores é realizada no seguinte item. Além disso, serão avaliados os principais parâmetros de influência sobre estas velocidades, que são a natureza da biomassa, o diâmetro de biomassa e inerte e as frações de biomassa nas misturas (χ).

Devido a divergências de nomenclaturas encontradas, neste trabalho as velocidades chamadas de mínima de fluidização de misturas (U_{mf} , $U_{mf,m}$) serão adotadas como velocidade de fluidização aparente (U_{fa}), conforme Mourad *et al.* (1994).

Tabela 2.3 Correlações empíricas propostas para misturas binárias de inertes

Autor	Correlação	Definições
Goossens (1971)	$Re_{fa} = \sqrt{(33,7^2 + 0,04086xAr_m - 33,7)}$	$Ar_m = \frac{d_{p,m}^3 \rho_g (\rho_{p,m} - \rho_g) g}{\mu_g^2}$ $\rho_{p,m} = \frac{\rho_{p,I} \rho_{p,E}}{\chi_E \rho_{p,I} + \chi_I \rho_{p,E}}$ $d_{p,m} = \frac{\chi_I \rho_{p,E} + \chi_E \rho_{p,I}}{\chi_I \rho_{p,E} d_E + \chi_E \rho_{p,I} d_I} d_{pI} d_{pE}$
Otero e Corella (1971)	$U_{fa} = U_{mf,I} \chi_I + U_{mf,E} \chi_E$	-
Chiba <i>et al.</i> (1979)	$U_{fa} = \frac{U_{mf,E}}{\left(1 - \frac{U_{mf,E}}{U_{mf,I}}\right) \chi^E + \frac{U_{mf,E}}{U_{mf,I}}}$	Destinada a velocidade mínima de fluidização para uma mistura do tipo segregada
Thonglimp <i>et al.</i> (1984)	$Re_{fa} = \sqrt{(19,9^2 + 0,03196xAr_m - 19,9)}$ $Re_{fa} = 3,40x10^{-3} Ar_m^{0,3} Mv^{-0,10}$	Ar_m conforme definido por Goossens (1971) $Mv = \frac{\rho_{p,m} - \rho_g}{\rho_g}$
Mourad <i>et al.</i> (1994)	$Re_{fa} = 5,52x10^{-4} Ar_m^{1,044}$ $Re_{fc} = 1,06x10^{-3} Ar_m^{1,044}$	Ar_m conforme definido por Goossens (1971)

Tabela 2.4 Dados experimentais da literatura utilizados em estudos fluidodinâmicos de biomassa

Autor	Biomassa	Inerte	Biomassa				Inerte			Características do leito		Metodologia
			$\rho_{p,b}$ (kg/m ³)	$d_{p,b}$	φ_b (-)	χ (%)	$\rho_{p,i}$ (kg/m ³)	$d_{p,i}$ (μ m)	φ_i (-)	D_c (m)	Distribuidor	
Aznar <i>et al.</i> (1992a, 1992b)	Serragem de pinus	Areia ¹	-	507 μ m	-	0-80	2700 ¹	-200+125 ¹ -297+200 ¹ -400+297 ¹ -500+400 ¹	-	0,14 e 0,30	<i>Bubble Caps</i>	$\Delta P \times U$
		Dolomita ²	1200 ²				-630+297 ²					
		FCC ³	1000 ³				65 ³					
	Resíduos carbonáceos	Areia	-	> 400 μ m	-	0-75	2700 ¹	-297+200 ¹	-	0,14 e 0,30	<i>Bubble Caps</i>	$\Delta P \times U$
	Chips de madeira	Areia ¹ FCC ²	-	28x16x5mm	-	0-70	2700 ¹ 1000 ²	-297+200 ¹ 65 ²	1 ²	0,14 e 0,30	<i>Bubble Caps</i>	$\Delta P \times U$
	Palha de cereais	Areia ¹	-	974 μ m	-	0-75	2700 ¹	-297+200 ¹	-	0,14 e 0,30	<i>Bubble Caps</i>	$\Delta P \times U$
		Areia ¹	-	23 mm (L)	-	0-97,5	2700 ¹	-200+125 ¹ -297+200 ² -400+297 ³ -500+400 ⁴				
		Areia ¹	-	50 mm (L)	-	0-60	2700 ¹	-297+200 ¹				
		FCC ²	-	974 μ m e 23 mm (L)	-	0-75	1000 ²	65 ²	1 ²			
		Areia ¹	-	Mistura (lascas de 17x10x9mm, palitos de 0,4x6mm, e filamentos de 45mmx19mm)	-	0-75	2700 ¹	-297+200 ¹ -500+400 ² -400+297 ³ -200+125 ⁴	0,14 e 0,30			
Rao e Bheemarasetti (2001)	Casca de arroz serragem casca de amendoim	Areia ¹	-	2x1x10mm	-	2-15	2500 ¹	-600+355 ¹	-	0,05	Malha de aço inoxidável	$\Delta P \times U$
		Areia ²	-	1000+800 μ m	-		2700 ²	-355+250 ²				
			-	1200+800 μ m	-							

L: comprimento d_p : diâmetro da partícula

Tabela 2.4 Dados experimentais da literatura utilizados em estudos fluidodinâmicos de biomassa – continuação

Autor	Biomassa	Inerte	Biomassa				Inerte			Características do leito		Metodologia
			$\rho_{p,b}$ (kg/m ³)	$d_{p,b}$	φ_b (-)	χ (%)	$\rho_{p,i}$ (kg/m ³)	$d_{p,i}$ (μ m)	φ_i (-)	D_c (m)	Distribuidor	
Rasul e Rudolph (2000)	Bagaço de cana-de-açúcar	FCC	492	200	-	10	1420	64	-	0,05	Placa porosa sinterizada	$\Delta P/\Delta H \times H$
		PVC					950	64				
		Polietileno					200	2000				
		Alumino silicato					690	64				
Abdullah <i>et al.</i> (2002)	Serragem	-	570,3	786,5 μ m	-	100	-	-	-	0,06	Placa perfurada	$\Delta P \times U$
	Casca de arroz		630,1	1500 μ m								
	Casca de amendoim		566,8	613,4 μ m								
	Casca de Coco		547,92	987,4 μ m								
	Fibra de palmeira		407,36	600 μ m								
	Carvão Cinzas		1450	518,8 μ m								
Ramakers <i>et al.</i> (2004)	Chips de <i>Fagus sylvatica</i>	Areia	722	Cilindros L:9mm d _p :6mm	-	10-33	2629	100-500	-	0,075	Placa de metal sinterizada	$\Delta P \times U$
							2669	400-600				
							2608	800-1200				
Tannous <i>et al.</i> (2008)	Casca de arroz	Alumina	1660,9	1180 μ m 1680 μ m	0,79	2,5-15	3900 – 3975,1	125,5 364	0,71	0,092	Placa perfurada	$\Delta P \times U$, $\sigma \times U$, $\varepsilon \times U$
Tannous e Mizonov (2009)	Casca de arroz	Alumina	1692,5 1598,2	1436,98 μ m 1979,50 μ m	0,24 0,27	2,5 – 15	3900; 3979,7	81,8 364	0,83 0,71	0,092	Placa perfurada	$\Delta P \times U$, $\sigma \times U$, $\varepsilon \times U$
Oliveira e Tannous (2009)	Casca de arroz	Areia	1598,2	1430 μ m e 1980 μ m	0,63	0-10	2647	358	0,75	0,092	Placa perfurada	$\Delta P \times U$, $\sigma \times U$, $\varepsilon \times U$
Rao e Reddy (2010)	Casca de arroz	Areia	589,5	2094 μ m	-	8	2520	930	-	0,09	Placa perfurada	$\Delta P \times U$
	Casca de amendoim		680,4	878 μ m		8		660				
	Serragem		716,2	578 μ m		20		440				
Mitri <i>et al.</i> (2011)	Resíduo de Jequitibá Rosa	Areia	1565	494 μ m	0,42	0-15	2652	336	0,87	0,092	Placa perfurada	$\Delta P \times U$, $\sigma \times U$, $\varepsilon \times U$
			1570	986 μ m								
			1553	2008 μ m								

2.5.3.1 Metodologias experimentais para a determinação das velocidades características

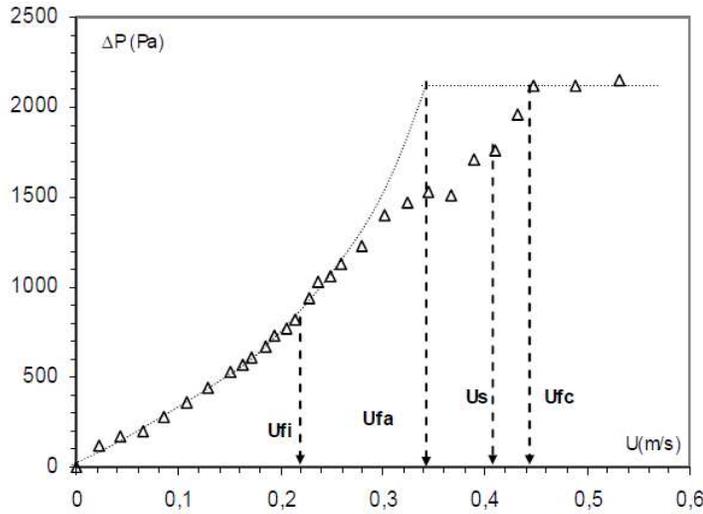
As metodologias utilizadas pelos autores listados na Tabela 2.4 foram: queda de pressão total (ΔP), desvio padrão total das flutuações de pressão (σ) e expansão do leito (ϵ), em função da velocidade superficial do gás (U).

O método da queda de pressão total consiste na medida da evolução da queda de pressão do leito, medida entre a base e o topo da coluna, em função da velocidade superficial do gás. A queda de pressão diminui suavemente desencadeando a separação dos materiais devido à diferença de massa específica, até o ponto de estagnação do leito. Com exceção de Ramakers *et al.* (2004) que partem de um leito fixo bem misturado e de Rao e Reddy (2010), de um leito arranjado, onde na base constava o inerte e ao topo a biomassa, aplicando velocidade ascendente do gás, todos os outros trabalhos usaram leitos completamente fluidizados e velocidade descendente do gás.

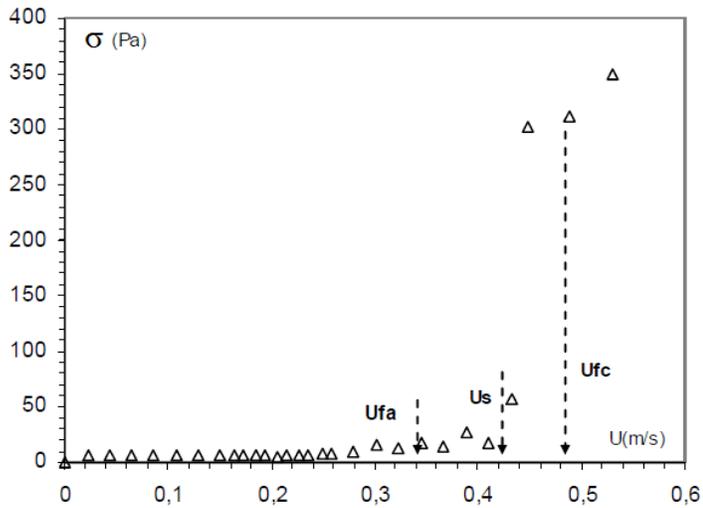
A evolução do desvio padrão total das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás pôde ser utilizada como outro método para a determinação das velocidades características. As velocidades foram determinadas pela alteração no declive das curvas do desvio padrão identificando mudança na formação de bolhas dentro do leito (TANNOUS; MIZONOV, 2009; OLIVEIRA; TANNOUS, 2009).

As velocidades também podem ser definidas através da expansão do leito, mediante a relação entre o volume de vazios combinados entre biomassa e inerte e volume total da mistura em função da velocidade superficial do gás (TANNOUS *et al.*, 2008; TANNOUS; MIZONOV, 2009; OLIVEIRA; TANNOUS, 2009; MITRI *et al.* 2011).

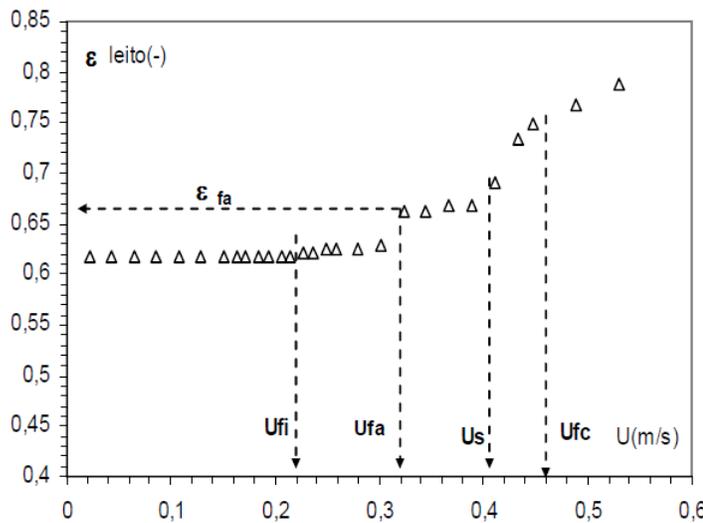
O emprego destes métodos para misturas biomassa/inerte pode ser exemplificado pelo trabalho de Oliveira e Tannous (2009), no qual todos os métodos acima descritos ($\Delta P/U$, σ/U e ϵ/U) foram utilizados para a determinação de velocidades características, sendo possível a identificação da velocidade de fluidização inicial (U_{fi}), velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) de segregação (U_s) e de fluidização completa (U_{fc}). Estas metodologias, aplicadas as misturas entre casca de arroz e areia, com razão de diâmetro entre biomassa e inerte (D) de 5,5 e fração mássica de biomassa na mistura de 7,5% (χ), são mostradas na Figura 2.12.



(a) Queda de pressão total



(b) Desvio padrão das flutuações de queda de pressão



(c) Expansão do leito

Figura 2.12 Métodos para determinação de velocidades características aplicados à mistura casca de arroz/areia ($D = 5,5$, $\chi = 7,5\%$) por Oliveira e Tannous (2009)

2.5.3.2 Influência da natureza da biomassa

Aznar *et al.* (1992) e Rao e Reddy (2010), conforme apresentado na Tabela 2.4, avaliaram diversas misturas de biomassas e inertes, caracterizando estas partículas em função de seus diâmetros. Como os trabalhos dos autores não variaram este parâmetro isoladamente, mantendo os demais parâmetros constantes, não há como avaliar individualmente a natureza da biomassa nas misturas.

Rao e Bhemarasetti (2001) avaliaram a fluidodinâmica de diferentes misturas de casca de arroz, serragem e casca de amendoim, cada material com seu próprio diâmetro característico (2x1x10 mm; -1000 + 800 μm ; -1200 + 800 μm , respectivamente), com inertes de diferentes massas específicas (2500 kg/m^3 e 2700 kg/m^3) e diâmetros (- 600 + 355 μm e -355 + 250 μm), em um leito de 0,05 m de diâmetro, conforme Tabela 2.4. Avaliando para a mistura com a casca de arroz, esta apresenta os maiores valores, e posteriormente a serragem e a casca de amendoim, mas esta tendência não acompanha os diâmetros de partículas das biomassas, inviabilizando um comparativo entre a natureza da biomassa.

Abdullah *et al.* (2003) estudaram o comportamento fluidodinâmico de biomassas da Malásia como a fibra de palmeira, serragem de madeira e, cascas de arroz, amendoim e coco. O carvão e suas cinzas provenientes de uma termoelétrica da região também foram usados como comparativo. Os dados destes materiais estão apresentados na Tabela 2.4. O parâmetro avaliado também foi a U_{fa} . O trabalho experimental foi desenvolvido em um leito cilíndrico de 0,06 m de diâmetro interno e 0,63 m de altura com um distribuidor do tipo placa perfurada. Entre as biomassas, a única não fluidizável foi a fibra de palmeira (massa específica aparente solta de 73 kg/m^3 e porosidade de 0,82). Para os outros materiais, as velocidades mínimas de fluidização foram de 0,22 m/s (serragem), 0,37 m/s (casca de arroz) e 0,29 m/s (casca de amendoim). Segundo os autores, partículas de serragem e casca de amendoim (categoria B de Geldart) apresentaram boa fluidização, ao contrário da casca de arroz (categoria D). Isto foi devido a elevada massa específica aparente solta e baixa porosidade solta para estes materiais (241 kg/m^3 e 0,577 para serragem e 250 kg/m^3 e 0,559 para a casca de amendoim), comportamento contrário à casca de arroz (129 kg/m^3 e 0,8).

2.5.3.3 Influência da razão de fração mássica entre biomassa e inerte

Aznar *et al.* (1992a,b) analisaram as propriedades fluidodinâmicas, velocidade fluidização aparente e completa para misturas de resíduos agrícolas e florestais com diferentes inertes. As biomassas e inertes usados foram: palha de cereais, chips de madeira, serragem, carvão provenientes da gaseificação da serragem de madeira e cardo (*Cynara carunculus*) de plantações energéticas com adição de inerte (areias, dolomita e catalisador de craqueamento catalítico - FCC). O trabalho analisa o efeito da fração volumétrica das biomassas (0 a 97,5 v-%). Ressalta-se que dentre os trabalhos da literatura analisado, estes autores foram os únicos a utilizarem frações volumétricas, ao invés da fração mássica comumente utilizada. Os autores concluíram que essas velocidades aumentam com a razão de fração volumétrica, e este aumento é mais pronunciado para a velocidade de fluidização completa.

Para a mistura de serragem (-2000 + 100 μm - $d_p = 507 \mu\text{m}$) e areia (-200+125 μm , -297+200 μm , -400+297 μm , -500+400 μm), as velocidades de fluidização aparente e completa aumentaram linearmente para frações de até 50 v-%, e após esta fração aumentam acentuadamente. No entanto, quando a serragem atinge de 75 v-% a 80 v-%, a mistura não é fluidizável. Observam-se nas Figuras apresentadas pelos autores que esta última faixa de fração só é válida para uma mistura composta de areia de diâmetro de peneira de -297+200 μm . Para a mistura com o FCC (65 μm), há um aumento crescente das duas velocidades sendo mais significativo para U_{fc} . Em torno de 80 v-%, a U_{fc} é 6 vezes maior que a U_{fa} . Para $U_{fa} < U < U_{fc}$ há um estado segregado, com a serragem presente na parte inferior do leito, enquanto o FCC fica na parte superior. Nestes casos nenhuma elutriação foi observada para velocidades iguais a U_{fc} , pois a velocidade é relativamente pequena para estas misturas. A mistura com dolomita foi realizada, e o comportamento das velocidades foram crescentes com a fração de biomassa, até uma fração de 70 v-%, com razão entre U_{fc}/U_{fa} máxima de 1,7 (AZNAR *et al.*, 1992a,b)

Para as misturas de palha (0,974 mm) e areia (-297+200 μm) há um aumento acentuado das U_{fa} e U_{fc} com a fração de biomassa nas misturas. Para as partículas cortadas com comprimento de 23 mm misturadas com areias de diferentes diâmetros (-200+125 μm , -297+200 μm , -400+297 μm , -500+400 μm), os autores observaram que com o aumento da fração a palha move-se com grande dificuldade devido a forma alongada e estreita, que causa a formação de canais no leito e não permitem a movimentação da palha. A partir de 30 v-% e $U_{fa} <$

$U < U_{fc}$, a palha tende a cair para a base do leito, caracterizando a segregação do mesmo. (AZNAR *et al.*,1992a,b)

Para a mistura de palha (50 mm) e areia (-297+200 μm) a fluidização é satisfatório para frações mássicas entre 20 v-% e 30 v-%, entre 40 v-% e 50 v-% a segregação ocorre para $U_{fa} < U < U_{fc}$, na base do leito e para $U > U_{fc}$, a segregação acontece na parte superior do leito. Acima de 60 v-%, a U_{fc} não pode ser definida, pois a palha permanece imóvel na base, sem fluidizar (AZNAR *et al.*,1992a,b).

Para a mistura de palha (974 μm) e FCC (65 μm) há um aumento crescente das duas velocidades características, sendo mais significativo para U_{fc} , até atingir 60 v-%. A U_{fa} cresce lentamente até 50 v-% é então abruptamente até 60 v-%. Para a palha de 23 mm misturada a este mesmo inerte a U_{fa} é praticamente constante com as frações de até 70 %, mas a U_{fc} não pode ser atingida para frações maiores que 50 v-% de biomassa, devido a elutriação do inerte (AZNAR *et al.*,1992a,b).

A mistura obtida entre a *Cynara cardunculus*, formada por um conjunto de partículas heterogêneas desta biomassa (Tabela 2.4), foi fluidizada com areia (-297 μm +200 μm) e a fluidização só foi possível para frações de até 75 v-%, devido ao efeito de segregação. Utilizando esta mistura de biomassa com o FCC (65 μm) pode-se observar que a U_{fc} é bem mais acentuada em relação a U_{fa} , em cerca de 5 vezes. Para a mistura de *Cynara cardunculus* de 19 mm com diferentes diâmetros de areia (-200 + 125 μm , -297+200 μm , -400+297 μm , -500+400 μm) as misturas não foram fluidizáveis para frações maiores que 60 v% – 75 v-% (AZNAR *et al.*,1992a,b).

Chips de madeira (28 x 16 x 5 mm) foram fluidizados com areia (-297+200 μm), e as velocidades comportaram-se da mesma forma definida para a serragem, *Cynara cardunculus*, e palha, com crescente aumento da fração de biomassa na mistura. Utilizando o FCC como inerte (65 μm), a variação da U_{fa} é muito pequena, comparativo a U_{fc} , que é bem acentuada, com velocidade máxima atingida de 15 m/s. Acima deste valor, o FCC começa a ser elutriado. O limite de fração de biomassa na mistura é de 65 v-%. Os autores utilizaram ainda um resíduo carbonáceo (> 400 μm) proveniente da gaseificação de serragem de *pinus* com areia (-297 μm +200 μm). As velocidades são crescentes até 35 v-% e maiores quando comparadas a serragem, visto que esta apresenta larga distribuição granulométrica (-2000+100 μm , $\bar{d}_p = 507 \mu\text{m}$) (AZNAR *et al.*,1992a,b)

Ramackers *et al.* (2004) analisaram misturas da madeira *Fagus sylvatica*, (diâmetro da esfera de volume equivalente de 7,9 mm) com areias com diferentes faixas de diâmetro (100 - 500 μm , 400 - 600 μm e 800 - 1200 μm) para a determinação da U_{fa} , porosidade do leito e frações mássicas de biomassa entre 10 m-% a 33 m-%. Os autores observaram um aumento da U_{fa} com a fração de biomassa nas misturas, sendo estas maiores para os maiores diâmetros de inerte. A porosidade foi crescente com o aumento da fração mássica de biomassa a partir de 5 m-% para o maior diâmetro de inerte e a partir de 20 m-% para os dois menores diâmetros. A melhor mistura, segundo os autores, foi obtida para o menor diâmetro de inerte e fração de biomassa de até 10 m-%, o que foi comprovado pelos experimentos de segregação.

Os trabalhos de Tannous *et al.* (2008) e de Tannous e Mizonov (2009) avaliaram misturas de dois diâmetros de casca de arroz (1180 μm e 1680 μm) e (1436,98 μm e 1979,50 μm), e dois diâmetros de inerte (125,5 μm e 364 μm) e (81,8 μm e 364 μm), respectivamente. Para partículas finas de inerte (81,8 μm e 125,5 μm) a velocidade aparente e completa e porosidade aparente são praticamente constantes até uma fração de 7,5 m-%, enquanto que para partículas médias estes parâmetros crescem significativamente.

Oliveira e Tannous (2009) utilizaram dois diâmetros de casca de arroz (1430 μm – 1980 μm) em uma mistura com areia (358 μm), conforme descrito na Tabela 2.4. Os trabalhos avaliaram a influência da fração de biomassa nas diferentes velocidades definidas: U_{fi} , U_{fa} , U_s e U_{fc} , além da porosidade aparente do leito na U_{fa} , definidas por ϵ_{fa} . As velocidades e porosidade aparente aumentam gradativamente com todas as frações.

Para as misturas avaliadas por Rao e Bhemarasetti (2001), de casca de arroz, serragem e casca de amendoim (2 x 1 x 10 mm; -1000 + 800 μm ; -1200 + 800 μm , respectivamente), com areias de diferentes massas específicas (2500 kg/m³e 2700 kg/m³) e diâmetros (- 600+355 μm e - 355+250 μm) também foi constatado um aumento da U_{fa} com a fração de biomassa nas misturas.

Mitri *et al.* (2011) avaliaram misturas binárias de resíduos da madeira jequitibá rosa (*Cariniana legalis*) e areia. Os experimentos foram realizados em uma coluna de acrílico de diâmetro interno de 0,092 m e placa perfurada de 5,89 % de área livre. Os sólidos escolhidos foram do tipo B (areia) e D (madeira) da classificação de Geldart (1986). As razões de diâmetro médio e de fração mássica entre os materiais variaram entre 1,47 e 5,98, e de 2,5 m-% a 15m-%, respectivamente, para uma razão de massa específica real constante de 0,59. Os autores observaram que os parâmetros estudados (U_{fi} , U_{fa} , U_{fc} , ϵ_{fa} , ϵ_{fc}) aumentaram com as frações de

biomassa propostas (0 - 15 m-%), com exceção do menor diâmetro de biomassa (494 μm), onde estes parâmetros diminuíram para frações maiores a 10 m-%, devido à inversão do leito, com a madeira depositada na superfície, impedindo a movimentação da mistura. Para o maior diâmetro de biomassa utilizado, a U_{fc} na fração de 12,5 m-% cresce abruptamente, provocando o colapso do leito, ficando a biomassa confinada na base, e impedindo o estudo de frações maiores para a mistura.

2.5.3.4 Influência do diâmetro do inerte, da biomassa e da variação de ambos

Conforme apresentado na Tabela 2.4, Aznar *et al.* (1992) avaliou a influência de diversos diâmetros de areia (-297+200 μm , -500+400 μm , -400+297 μm e -200+125 μm) em misturas com serragem (507 μm), palha de cereal (0,974 mm e 23 mm) e *Cynara cardunculus* (mistura de lascas de 17 x 10 x 9mm, palitos de 0,4 x 6 mm, e filamentos de 45 mm de comprimento). Na mistura com serragem, há um aumento das velocidades características (U_{fa} e U_{fc}) com o diâmetro do inerte utilizado, sendo a razão entre U_{fc}/U_{fa} mantida em torno de dois em todas as misturas. Para as misturas com a palha e *Cynara cardunculus*, o aumento do diâmetro da biomassa ou do inerte, provocou o aumento das velocidades de mistura, sendo o comportamento da U_{fc} mais acentuado que a U_{fa} .

Rasul e Rudolph (2000) avaliaram a razão de massa específica e diâmetro entre biomassa e inerte através do estudo da mistura e segregação de catalisadores de craqueamento catalítico (FCC), cloreto de polivinila (PVC), esferas de alumino-silicato e poliestireno como inertes, utilizando como biomassa o bagaço de cana-de-açúcar, em um leito fluidizado (DI = 5 cm). Os diâmetros de inerte foram variados de 64 μm a 2000 μm e massa específica de 200 kg/m^3 a 1420 kg/m^3 , misturadas a palha de cana-de-açúcar de 200 μm e 492 kg/m^3 . As frações mássicas utilizadas foram de 10 m-% de bagaço-de-cana na mistura com o FCC, e 90 m-% de biomassa na mistura com o poliestireno. Para a mistura PVC/biomassa, esta relação não foi informada. Para a mistura com as esferas de alumino-silicato, foram utilizadas frações mássicas de bagaço de cana-de-açúcar de até 25 m-%.

Para avaliar as misturas entre biomassa e inertes propostas, os autores utilizaram como variável de resposta a massa específica aparente solta do leito (*bulk density*). Os autores exemplificaram esta metodologia para a mistura de esferas de alumino-silicato ($\bar{d}_p = 64 \mu\text{m}$, $\rho_p = 690 \text{kg}/\text{m}^3$), com o bagaço-de-cana, para as quais a massa específica aparente solta do leito

manteve-se constante com a variação das frações de biomassa de até 25 m-%, para as velocidades de 0,004 m/s, 0,0005 m/s e 0,006 m/s, indicando que para estas condições o leito apresenta mistura efetiva (RASUL; RUDOLPH, 2000).

Outros experimentos foram conduzidos com misturas com FCC ($\bar{d}_p = 64 \mu\text{m}$, $\rho_p = 1420 \text{ kg/m}^3$), contendo 10 m-% de biomassa, onde se verificou que para velocidades entre U_{mf} e U_{mb} do inerte não houve mistura, com o bagaço segregado no topo do leito. Comportamento similar foi observado para a mistura com PVC ($\bar{d}_p = 64 \mu\text{m}$, $\rho_p = 920 \text{ kg/m}^3$), onde o bagaço novamente segregou para o topo do leito. Utilizando o poliestireno como inerte, a uma fração de biomassa de 90 m-%, o bagaço ficou estratificado na base do leito. Nenhum destes experimentos, conduzidos à velocidades abaixo de U_{mb} , apresentou mistura efetiva. Os autores afirmam, no entanto, que na prática a velocidade superficial do gás utilizada em combustores é sempre maior do que a de mínimo borbulhamento, o que tende a produzir bolhas, que provocam a mistura dos componentes do leito e permitem condições de misturas estáveis (RASUL; RUDOLPH, 2000).

Rao e Bhemarasetti (2001) avaliaram o efeito dos diâmetros de inerte na fluidodinâmica de diferentes misturas de casca de arroz (2 x 1 x 10mm), serragem (- 1000 + 800 μm) e casca de amendoim (- 1200 + 800 μm), com areia de diferentes massas específicas (2500 kg/m^3 e 2700 kg/m^3) e diâmetros (- 600+355 μm e -355+250 μm), em um leito de 0,05 m de diâmetro, conforme apresentado na Tabela 2.4. Os autores concluíram que a velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) praticamente dobrou com o aumento do diâmetro do inerte, para frações de até 10 m-%, sendo que acima deste a velocidade é praticamente constante (3%) para as misturas com serragem e casca de amendoim. No entanto, para a maior fração de casca de arroz, a velocidade foi mais influenciada, com um aumento de 12,5 %, para a maior fração (15 m-%).

Ramarkers *et al.* (2004) analisaram a U_{fa} , a porosidade do leito e o fenômeno da segregação das misturas contendo de 10 m-% a 33 m-% da madeira *Fagus sylvatica*, em diferentes diâmetros de areia. As areias utilizadas como inerte foram classificadas como fina (100-500 μm , 2629 kg/m^3 e $U_{mf} = 0,13 \text{ m/s}$), média (400-600 μm , 2660 kg/m^3 , $U_{mf} = 0,22 \text{ m/s}$) e grossa (800-1200 μm , 2608 kg/m^3 e $U_{mf} = 0,51 \text{ m/s}$). Os autores utilizaram um leito de vidro com diâmetro interno de 0,0756 m, conforme apresentado na Tabela 2.4. A madeira utilizada tinha um diâmetro de esfera de volume equivalente de 7900 μm e massa específica de 722 kg/m^3 . Os autores observaram que a U_{fa} cresce com o diâmetro da areia, para todas as misturas consideradas.

Oliveira e Tannous (2009) estudaram o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias de casca de arroz (1430 μm e 1980 μm) e areia (306,93 μm), mediante a variação do diâmetro da biomassa (Tabela 2.4). Todas as velocidades analisadas pelos autores (U_{fi} , U_{fa} , U_s e U_{fc}) e ε_{fa} foram maiores para o menor diâmetro de biomassa na mistura com relação ao diâmetro da biomassa. Os autores não discutem o motivo deste comportamento, mas isso pode ser atribuído ao efeito da segregação total da biomassa na base do leito e o inerte no topo do leito, tornando a fluidização composta basicamente pelo inerte.

Mais recentemente, encontra-se o trabalho de Rao e Reddy (2010), onde os autores estudaram misturas biomassa/inerte, sendo estes a casca de arroz (2094 μm e 589,5 kg/m^3), serragem (578 μm e 716,2 kg/m^3) e casca de amendoim (8780 μm e 680,4 kg/m^3), com três diferentes diâmetros de areia: 400 μm , 660 μm e 930 μm ($\rho_p = 2519 \text{ kg}/\text{m}^3$). O equipamento utilizado foi um leito cilíndrico com DI de 0,09 m, conforme Tabela 2.4. Os autores encontraram experimentalmente que a velocidade de fluidização aparente (U_{fa}) aumentou com o diâmetro de inerte para as misturas de casca de arroz e serragem, enquanto que para o amendoim não foi evidenciada uma tendência lógica. Os autores recomendam o diâmetro intermediário de inerte (660 μm) para a melhor mistura.

Tannous *et al.* (2008, 2009) estudaram a influência dos diâmetros de biomassa (casca de arroz) em mistura com um inerte (alumina) usando dois leitos fluidizados (cilíndrico e cônico), conforme detalhado na Tabela 2.4. O inerte e a biomassa utilizados, bem como seus diâmetros e massas específicas respectivas, foram: alumina fina (81,80 μm e 3900 kg/m^3) e média (364 μm e 3975,1 kg/m^3) e a casca de arroz do tipo I (1436,98 μm e 1692,50 kg/m^3) e II (1979,50 μm e 1598,20 kg/m^3). As razões de diâmetro entre a biomassa e inerte foram de 5,4; 17,6 e 24,2 e as das frações mássicas de 2,5 m-% a 15 m-%. Com o aumento da razão de diâmetros, as U_{fi} e U_{fa} diminuem de forma considerável, havendo uma predominância do diâmetro da biomassa sobre estas velocidades. Para a U_{fc} as razões de diâmetro 5,4 e 17,6 são semelhantes até 10 m-% e aumentam acima desta fração. Comparativo a maior razão, o aumento das velocidades é mais significativo.

O trabalho de Mitri *et al.* (2011), conforme apresentado no item 2.5.3.3, avaliou ainda a influência do diâmetro da biomassa nas misturas. A melhor mistura foi obtida usando a razão de diâmetros entre biomassa e inerte de 2,94 (986 μm /336 μm), com U_{fc} cerca de duas vezes maior que a U_{fa} . Além disso, para frações abaixo de 10 m-% de biomassa, os leitos comportaram-se de

forma praticamente homogênea, havendo misturas efetivas. De acordo com os autores, a depender da razão de diâmetros, a U_{fa} poderá estar em uma região de alta segregação.

2.5.3.5 Correlações aplicadas para a análise das velocidades características

Há uma carência de correlações empíricas na literatura para a determinação das velocidades características de misturas, no que tange misturas de biomassas.

Grande parte dos trabalhos científicos encontrados na literatura usam artifícios a fim de averiguar a aplicabilidade das correlações já existentes e conceituadas perante a comunidade científica. Citam-se aquelas para partículas homogêneas (WEN; YU, 1966; BABU *et al.*, 1978; GRACE, 1982; TANNOUS *et al.*, 1994) e misturas binárias aplicando inertes e produtos alimentícios (GOOSSENS, 1971; OTERO; CORELLA, 1971; CHIBA *et al.*, 1979; THONGLIMP *et al.*, 1984; MOURAD *et al.*, 1994).

Na busca por novas correlações que caracterizassem a mistura completa (U_{fc}) de biomassa e inerte, encontrou-se o trabalho de Bilbao *et al.* (1987), conforme apresentada na Tabela 2.5. Esta velocidade é dependente das velocidades de mínima fluidização das partículas imergíveis (biomassa) e emergíveis (inerte), sendo a primeira determinada empiricamente e a segunda experimentalmente. Além disso, a função é também dependente da fração de inerte na mistura.

Rao e Bheemarasetti (2001) definem uma equação para a determinação de U_{fa} partindo da equação originária de Wen e Yu (1966) considerando número de Reynolds menor que 20 (Kunii e Levenspiel, 1991). Nesta equação os autores introduziram dois novos parâmetros: diâmetro e massa específica efetiva de mistura (Tabela 2.5). O diâmetro efetivo é função de um parâmetro k' , dependente do diâmetro do inerte. Além disso, este parâmetro depende dos diâmetros médios, massas específicas e massas da biomassa e inerte. A massa específica efetiva da mistura é obtida através da média ponderada, relacionando as massas específicas e frações mássicas dos componentes da mistura.

Mitri *et al.* (2011) propuseram uma correlação (Tabela 2.5) para a determinação do número de Reynolds na fluidização aparente (Re_{fa}) em função do número de Arquimedes da mistura (Ar_m), a partir do ajuste em série de potência (TANNOUS *et al.*, 2008; TANNOUS, MIZONOV, 2009; OLIVEIRA, TANNOUS, 2009). Os números de Arquimedes e Reynolds foram definidos de acordo com Goossens (1971). Comparando os dados teóricos e experimentais para as misturas considerados pelos autores, o erro obtido foi de 42 %.

Tabela 2.5 Equações utilizadas para o cálculo teórico das velocidades características de misturas
(U_{fa} e U_{fc})

Autor	Correlação	Definições
Rao e Bheemarasetti (2000)	$U_{fa} = \frac{d_{p,ef}^2 (\rho_{ef} - \rho_g) g}{1650 \mu_g}$	$d_{p,ef}^2$ $= k' \left\{ d_{p,i} \left[\left(\frac{\rho_{p,i}}{\rho_{p,b}} \right) \left(\frac{d_{p,b}}{d_{p,i}} \right) \right]^{m_b/m_i} \right\}^2$ $k' = 20d_{p,i} + 0,36$ $\rho_{ef} = \frac{m_i \rho_{p,i} + m_b \rho_{p,b}}{m_b + m_i}$
Mitri <i>et al.</i> (2011)	$Re_{fa} = 2,726 \times 10^{-4} Ar_m^{1,2}$	Ar_m de acordo com Goossens (1971), conforme Tabela 2.3
Bilbao <i>et al.</i> (1987)	$U_{fc} = U_{mf,I} - (U_{mf,I} - U_{mf,E}) \chi_E$	$U_{mf,I} = 50 \bar{d}_{p,I}^{0,84}$

Capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais sólidos escolhidos

Os materiais sólidos escolhidos para o estudo fluidodinâmico de misturas binárias foram a madeira de eucalipto e o caroço de tucumã, como biomassas, e a areia, como inerte.

A madeira de eucalipto, da espécie *Eucalyptus grandis*, com 6,5 anos de idade, foi cedida pela empresa Suzano Papel e Celulose, da cidade de Americana-SP. Trata-se da matéria-prima utilizada para produção de celulose e papel, a qual chegou ao laboratório no formato de *chips* de diâmetros variados (Figura 3.1).

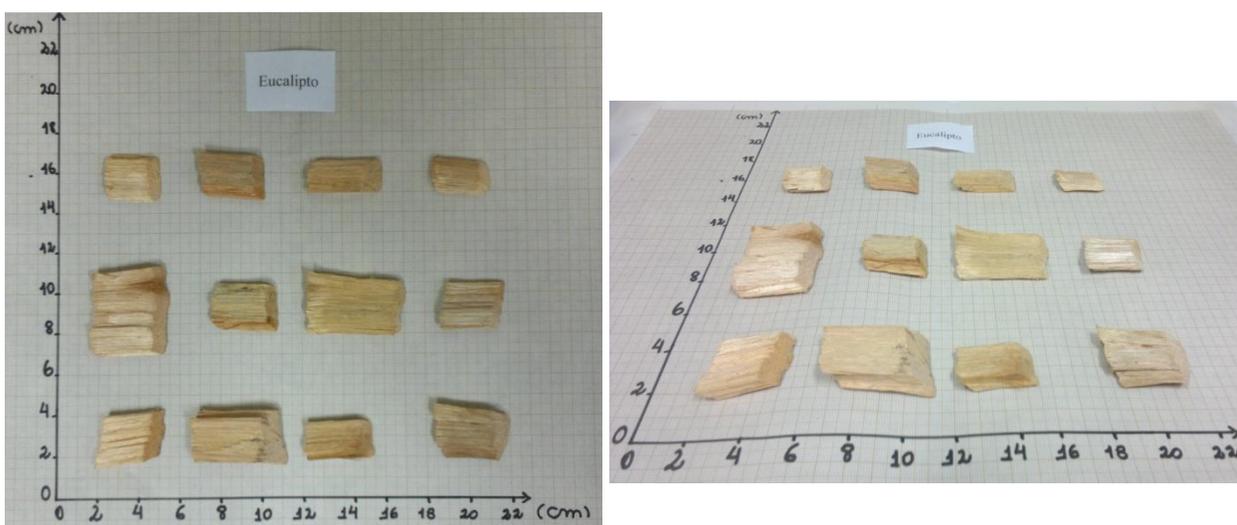


Figura 3.1 Amostras de eucalipto no formato de *chips*

O caroço do fruto do tucumã foi obtido como resíduo do consumo de sua fruta, usada para fins alimentícios, sendo coletado na cidade de Parintins (AM), conforme Figura 3.2.

A areia utilizada foi do tipo quartzosa, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), apresentada na Figura 3.3.



Figura 3.2 Imagens do caroço do tucumã inteiro e seccionado



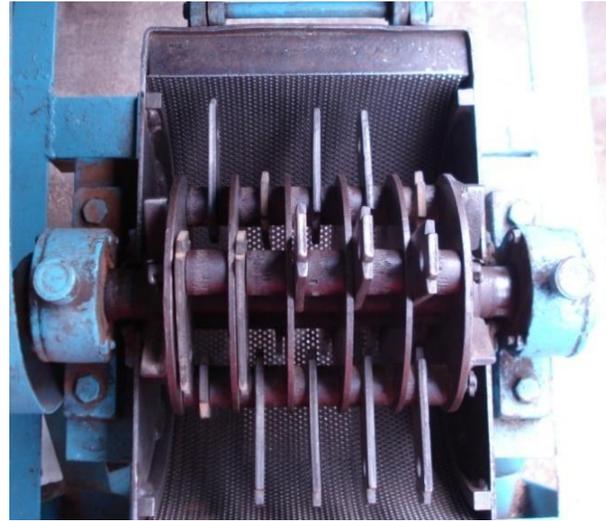
Figura 3.3 Areia quartzosa utilizada para os ensaios fluidodinâmicos

3.2 Processo de moagem das biomassas

As biomassas foram moídas em um moedor de martelo (Máquinas Tigre S.A., CV2, Brasil) acoplado a um motor de indução (General Electric, 25.4062.405, Brasil), como mostrado na Figura 3.4. O equipamento pertence à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (FEQ/UNICAMP). Para as moagens, realizadas em bateladas, foram utilizados os tempos de 21 s e 46 s, e massas de 17 g e 70 g, para o eucalipto e o caroço do tucumã, respectivamente. Estas condições foram baseadas no trabalho de Farias (2012).



(a) Vista lateral



(b) Vista interna (martelo)

Figura 3.4 Moinho de martelo utilizado na moagem das biomassas

3.3 Amostragem

Para a seleção das amostras, os materiais foram submetidos a um processo de subdivisão em um divisor de amostras rotatório (Fritsch, Laborette 27. 102/292, Alemanha, 50/60 Hz) acoplado a um alimentador vibratório (Fritsch, Laborette 24. 003/1345, Alemanha, 50/60 Hz). Este processo dividiu o material em oito porções, até a obtenção da massa adequada para os ensaios de caracterização, realizados em triplicata.

3.4 Parâmetros estatísticos de medida

Os ensaios a seguir descritos foram analisados e comparados mediante diferentes critérios estatísticos:

- Erro Relativo Médio Absoluto, ERMA (%):

$$ERMA = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_e - x_t|}{x_e} \quad (3.1)$$

onde:

n: número total de amostras

x_e = valor experimental

x_t = valor teórico

- Desvio Padrão, S:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{i,s} - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

onde:

S= desvio padrão

$x_{i,s}$ = i - ésimo valor do parâmetro de referência

\bar{x} = média amostral

Para os ensaios onde não foram realizadas duplicatas, atribuiu-se o erro relativo do equipamento às medições.

3.5 Caracterização física

3.5.1 Distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas

Para a realização da distribuição granulométrica, utilizou-se o método de peneiramento. Foram escolhidas peneiras da série Tyler (Granutest, Brasil) do número 6 a 100 (3360 a 150 μm), de acordo com as faixas de diâmetros dos materiais escolhidos, mantendo a razão de abertura entre peneiras em $\sqrt{2}$. Para cada experimento, foram usadas séries de cinco peneiras, mais a peneira de fundo, as quais foram colocadas em um vibrador (Produtest, Modelo T, Brasil) por um tempo de 15 min e amplitude de frequência igual a 9.

As massas utilizadas em cada peneiramento foram definidas de forma a não provocar a obstrução das peneiras, sendo usadas 5 gramas para o eucalipto, 10 gramas para o tucumã e 50 gramas para a areia. Os ensaios foram realizados em triplicata.

Cada peneira foi pesada antes e depois do processo de separação, usando uma balança eletrônica (GEHAKA, BG 4000, Brasil, 0,005g), para a determinação da fração mássica retida em cada peneira (x_i) no processo. Com este valor, e a média aritmética entre os diâmetros das peneiras inferiores e superiores a que as partículas ficaram retidas (\bar{d}_{pi}), pôde-se calcular o

diâmetro médio de Sauter dos materiais (\bar{d}_p), o qual é amplamente utilizado em equações fluidodinâmicas, e definido pelas Equações 3.3 e 3.4:

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

onde:

$$\bar{d}_{pi} = \frac{d_{pi} + d_{pi+1}}{2} \quad (3.4)$$

Entre a Figura 3.5 e Figura 3.7 estão apresentadas às distribuições granulométricas dos materiais (areia, eucalipto e caroço do fruto do tucumã), de acordo com as frações mássicas retidas em cada diâmetro médio entre peneiras consecutivas, bem como seus diâmetros médios de Sauter, conforme Equação 3.3. Os diâmetros obtidos foram: 331 μm para a areia; 508 μm , 986 μm e 1993 μm para o eucalipto; 502 μm , 1017 μm e 2017 μm para o caroço do fruto do tucumã. As imagens destes materiais moídos e separados de acordo com os diâmetros escolhidos estão apresentadas nas Figura 3.8 e Figura 3.9. Na Tabela 3.1 apresenta-se a síntese dos diâmetros de Sauter com seus respectivos desvios padrões, relativos à triplicata (Equação 3.2)

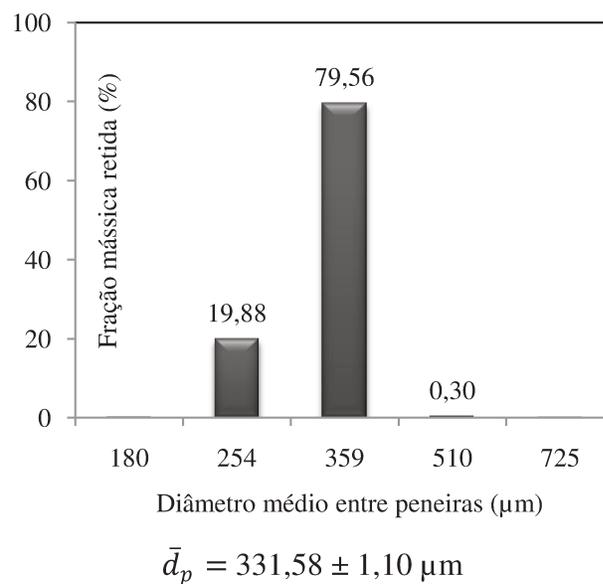
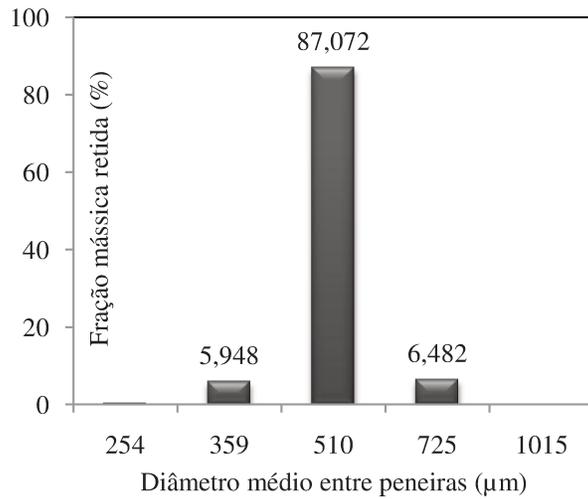
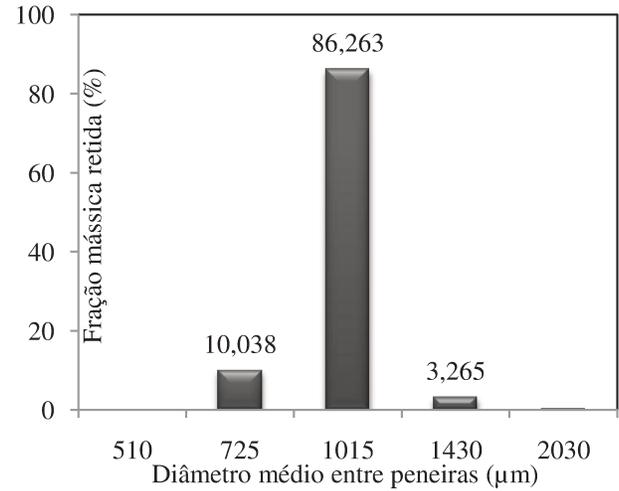


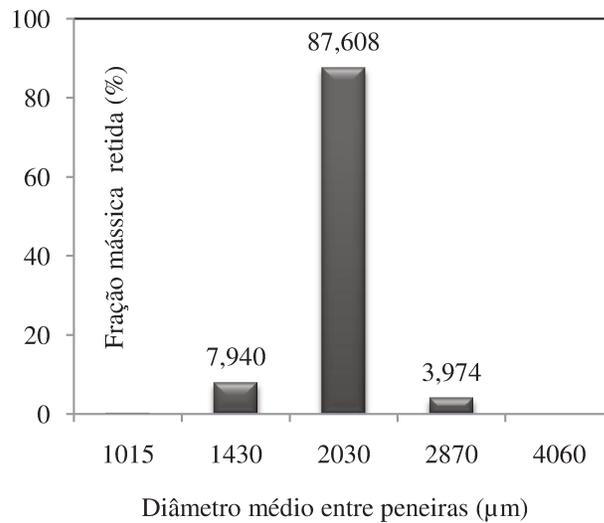
Figura 3.5 Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter da areia



(a) $\bar{d}_p = 508,73 \pm 2,29 \mu\text{m}$

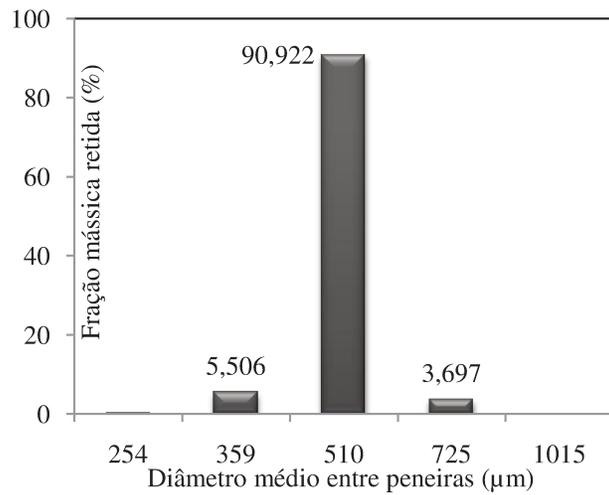


(b) $\bar{d}_p = 986,67 \pm 4,50 \mu\text{m}$

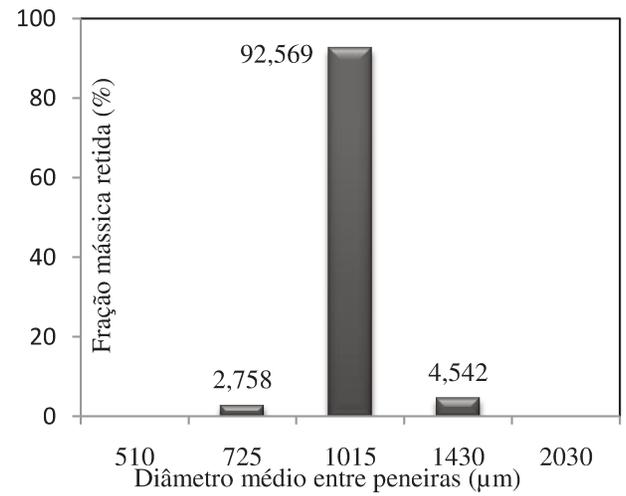


(c) $\bar{d}_p = 1993,71 \pm 9,89 \mu\text{m}$

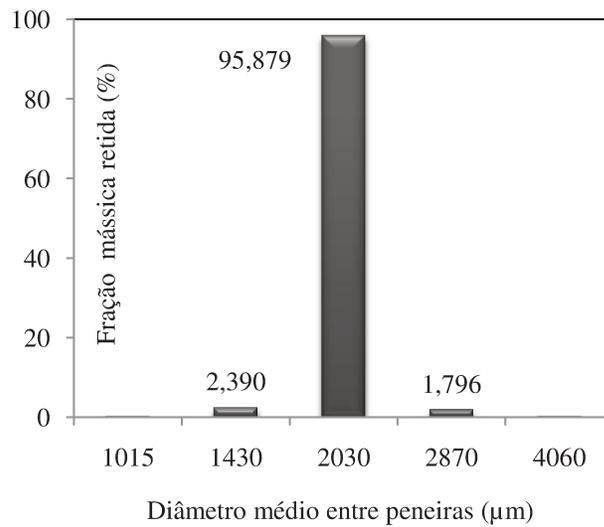
Figura 3.6 Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter do eucalipto



(a) $\bar{d}_p = 502,47 \pm 1,68 \mu\text{m}$



(b) $\bar{d}_p = 1017,46 \pm 0,97 \mu\text{m}$



(c) $\bar{d}_p = 2017,37 \pm 7,36 \mu\text{m}$

Figura 3.7 Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter do tucumã



(a) $\bar{d}_b = 508,73 \mu\text{m}$



(b) $\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$



(c) $\bar{d}_b = 1993,71 \mu\text{m}$

Figura 3.8 Imagens do eucalipto após o processo de moagem e peneiramento para os diâmetros escolhidos



(a) $\bar{d}_b = 502,47 \mu\text{m}$



(b) $\bar{d}_b = 1017,46 \mu\text{m}$



(c) $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$

Figura 3.9 Imagens do tucumã após o processo de moagem e peneiramento para os diâmetros escolhidos

Tabela 3.1 Dados experimentais das propriedades físicas dos materiais sólidos

Material Sólido	\bar{d}_p (μm)	ρ_p (kg/m^3)	ρ_s (kg/m^3)	ε_p (-)	φ (-)				
					Wadell (1935)	Riley 1941)	Curaray(1951)	Massarani e Peçanha (1986)	
					φ (Medição direta com paquímetro)				
Eucalipto	508,73 \pm 2,29		1575,95 \pm 4,00	0,75	0,36 \pm 0,13	0,37 \pm 0,13	0,20 \pm 0,09	0,15 \pm 0,11	
	986,67 \pm 4,50	394,92	1571,87 \pm 3,73	0,75	0,41 \pm 0,13	0,38 \pm 0,08	0,22 \pm 0,08	0,15 \pm 0,07	
	1993,71 \pm 9,89		1503,72 \pm 5,10	0,74	0,50 \pm 0,07	0,40 \pm 0,07	0,28 \pm 0,07	0,16 \pm 0,06	
						φ (APOGEO)			
		508,73 \pm 2,29				0,42 \pm 0,03	0,40 \pm 0,05	0,23 \pm 0,04	0,16 \pm 0,04
		986,67 \pm 4,50				0,47 \pm 0,06	0,41 \pm 0,09	0,27 \pm 0,07	0,18 \pm 0,08
	1993,71 \pm 9,89				0,52 \pm 0,05	0,41 \pm 0,07	0,30 \pm 0,06	0,17 \pm 0,06	
Tucumã	502,47 \pm 1,68		1442,59 \pm 1,77	0,23	-	0,81 \pm 0,04	-	0,66 \pm 0,06	
	1017,46 \pm 0,97	1115,01	1428,34 \pm 0,70	0,22	-	0,85 \pm 0,01	-	0,72 \pm 0,02	
	2017,37 \pm 7,36		1424,61 \pm 0,66	0,22	-	0,89 \pm 0,01	-	0,79 \pm 0,02	
Areia	331,59 \pm 1,10	2636 ¹	2656,71 \pm 0,87	0,0078	-	0,85 \pm 0,11	-	0,73 \pm 0,19	

¹Santos (1997)

3.5.2 Esfericidade

A esfericidade dos materiais (ϕ) foi determinada a partir de quatro equações da literatura (Tabela 3.2), sendo estas: Wadell (1935), Riley (1941), Curray (1951), Massarani e Peçanha (1986), as quais relacionam duas ou três dimensões da partícula. As medições foram realizadas através de paquímetro digital (Digimess, 100174, China) e por capturação (HP, Scanjet 3800, China) e processamento de imagens mediante o software APOGEO, desenvolvido no LaProM/FEQ/UNICAMP (SILVA; TANNOUS, 2012).

As partículas de eucalipto apresentaram forma regular, sendo estas aproximadas à forma de um paralelepípedo retângulo (Figura 3.10a) onde se definiu as três dimensões (a , b e c) e duas dimensões correspondentes às esferas inscritas (Figura 3.10b) e circunscritas (Figura 3.10c). Todas as equações escolhidas acima, e representadas na Tabela 3.2 para a geometria, puderam ser aplicadas e os valores obtidos foram comparados (Tabela 3.1).

O caroço do fruto do tucumã e a areia foram consideradas partículas irregulares, tendo suas esfericidades definidas somente pelas equações de Riley (1941) e Massarani e Peçanha (1986). A ilustração de uma partícula irregular está apresentada na Figura 3.11, e as equações na forma como foram aplicadas a estas partículas estão listadas na Tabela 3.2.

Devido à dificuldade de medição dos diâmetros inscritos e circunscritos das partículas, o software APOGEO foi utilizado a fim de auxiliar no processamento das imagens. Após a digitalização das partículas através de um escâner, o software processou as imagens (arquivo .jpeg) em duas dimensões e sugeriu o valor da terceira dimensão para diferentes formas de partículas. A esfericidade foi calculada automaticamente, de acordo com as equações disponíveis em seu banco de dados, para a forma do material previamente definida. Para a determinação da esfericidade do eucalipto, aplicando o software APOGEO, o valor da terceira dimensão (c) foi usado como uma fração de b , determinada pelas medições com paquímetro. Para os diâmetros de Sauter de 508 μm , 986 μm e 1993 μm , o valor de c foi considerado como 0,27, 0,36 e 0,48 vezes o valor de b , respectivamente.

As medidas das dimensões características determinadas manualmente para o eucalipto, e os dados do APOGEO para o caroço do fruto do tucumã e a areia estão apresentados na Tabela 3.3, com seus respectivos desvios padrões (Equação 3.2).

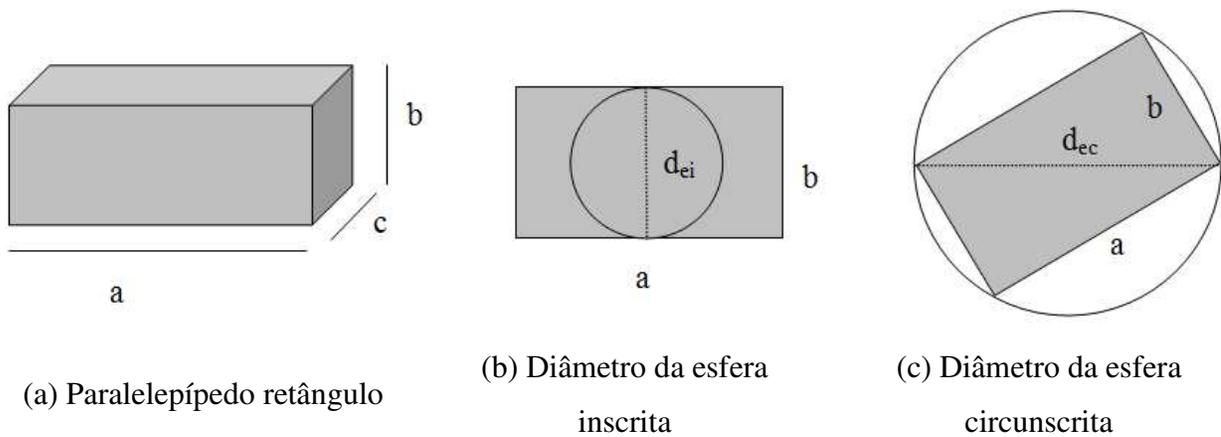


Figura 3.10 Representação da partícula de eucalipto

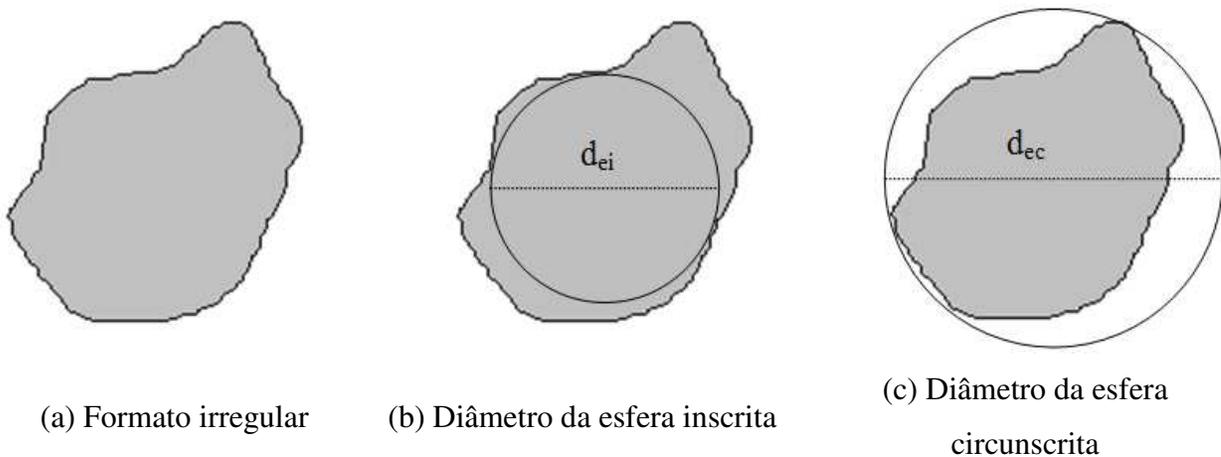


Figura 3.11 Representação de uma partícula irregular - Carço do fruto do tucumã e areia

Tabela 3.2 Equações utilizadas para a determinação da esfericidade de acordo com o material sólido

Autor	Definição	Equação Geral	Equação Específica - Eucalipto	Equação Específica - Tucumã e areia
Wadell (1935)	Razão entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula (A_{se}) e a área superficial da partícula (A_{sp})	$\varphi_W = \frac{A_{se}}{A_{sp}}$	$\varphi = \frac{2\pi \left(\frac{3abc}{4\pi}\right)^{2/3}}{(ab + ac + bc)}$	-
Riley (1941)	Raiz quadrada entre o diâmetro da esfera inscrita (d_{ei}) e o diâmetro da esfera circunscrita (d_{ec}) a uma partícula	$\varphi_R = \sqrt[2]{\frac{d_{ei}}{d_{ec}}}$	$\varphi = \sqrt{\frac{b}{(a^2 + b^2)^{1/2}}}$	$\varphi = \sqrt[2]{\frac{d_{ei}}{d_{ec}}}$
Curry (1951)	Raiz quadrada da razão entre o volume do sólido (V_s) e o volume de uma esfera circunscrita (V_{ec}) a este sólido	$\varphi_C = \sqrt[3]{\frac{V_s}{V_{ec}}}$	$\varphi = \sqrt[3]{\frac{6abc}{\pi(a^2 + b^2)^{3/2}}}$	-
Massarani e Peçanha (1986)	Razão entre os diâmetros das esferas inscritas e circunscritas a um material	$\varphi_{MP} = \frac{d_{ei}}{d_{ec}}$	$\varphi = \frac{b}{(a^2 + b^2)^{1/2}}$	$\varphi = \frac{d_{ei}}{d_{ec}}$

Tabela 3.3 Dimensões lineares médias para diferentes diâmetros de Sauter

Sólido	\bar{d}_p (μm)	Dimensão (mm)				
		a	b	c	b/a	c/a
Eucalipto	508,73	4,07±2,04	0,48±0,18	0,13±0,07	0,12±0,09	0,03±0,03
	986,67	7,19±2,37	0,97±0,20	0,35±0,12	0,13±0,08	0,05±0,05
	1993,71	14,06±3,81	2,17±0,40	1,03±0,36	0,15±0,10	0,07±0,09
Caroço do fruto do tucumã	502,48	0,35±0,06	0,23±0,05	-	0,66±0,06	-
	1017,53	0,77±0,10	0,56±0,06	-	0,72±0,02	-
	2008,93	1,47±0,17	1,16±0,15	-	0,79±0,02	-
Areia	331,59	0,27±0,07	0,19±0,05	-	0,73±0,19	-

Os resultados finais das esfericidades estão apresentados na Tabela 3.1. Observa-se que há uma divergência entre os valores das esfericidades pelas técnicas escolhidas, variando de 23% a 3% (maior diâmetro), sendo que para as equações de Riley (1941) e Massarani e Peçanha (1986), o erro máximo percentual encontrado foi de 8% (menor diâmetro).

Com relação à diferença entre as metodologias aplicadas, observa-se uma concordância maior entre os métodos de Wadell (1935) e Riley (1941) com uma maior diferença (25%) para as maiores partículas. Assim, pode-se concluir que a espessura (c) tem expressiva importância nos resultados da forma e não pode ser desprezada na análise geométrica das partículas.

Com relação influência do diâmetro sobre a esfericidade, observa-se que para Wadell (1935), o aumento é significativo, correspondente a 39% e para Riley (1941), este aumento é pequeno, com somente 8%.

Por isso, neste trabalho serão consideradas as equações para o cálculo da esfericidade de Wadell (1935) para o eucalipto e de Riley (1941) para as partículas irregulares (tucumã e areia).

3.5.3 Massa específica aparente e real

3.5.3.1 Massa específica aparente

Para a determinação da massa específica aparente (ρ_p) das biomassas, utilizou-se um porosímetro de mercúrio (AMINCO, N.5-7118, Estados Unidos) pertencente ao Laboratório de Revestimentos Cerâmicos da Universidade Federal de São Carlos. Esta determinação é

importante devido ao emprego desta variável em análises fluidodinâmicas, pois considera o volume da partícula sólida como aquele efetivamente ocupado no leito.

Devido à limitação do equipamento, somente foi possível a utilização de pedaços (aprox. 1 cm³) de eucalipto e caroço do fruto do tucumã, cujas características estão descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Massa específica aparente dos sólidos

Sólido	m_a (kg)	V_p (m ³)	ρ_p (kg/m ³)
Eucalipto	$0,027 \times 10^{-3}$	$0,0684 \times 10^{-3}$	394,92
Tucumã	$0,1207 \times 10^{-3}$	$0,1082 \times 10^{-3}$	1115,01
Areia ¹	0,002	$7,5900 \times 10^{-7}$	$2636 \pm 115,5$

¹Santos (1997)

As biomassas foram colocadas em um penetrômetro de 20 cm³ (V_{pt}), previamente pesado (m_{pt}), em balança analítica (Quimis, Q-500L210C, 0,00005 g). A célula com a amostra de biomassa foi evacuada para retirada de umidade e em seguida preenchida com mercúrio, sendo a massa ao final deste processo registrada como m_f . Subtraindo da m_f a massa do penetrômetro (m_{pt}) e a massa de amostras (m_a), determinou-se a massa ocupada pelo mercúrio no penetrômetro (m_m) (Equação 3.5). Sabendo sua massa específica (13600 kg/m³), pode-se determinar também o volume ocupado pelo mercúrio (V_m) (Equação 3.6). A diferença entre o volume da célula vazia (V_c) e o volume ocupado pelo mercúrio, que envolve a amostra, é o volume da partícula (V_p), conforme Equação 3.7. Com a razão entre a massa da amostra previamente pesada e o volume da amostra, tem-se a massa específica aparente da biomassa, conforme Equação 3.8:

$$m_m = m_f - (m_{pt} + m_a) \quad (3.5)$$

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad (3.6)$$

$$V_p = V_{pt} - V_m \quad (3.7)$$

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

Observa-se na Tabela 3.4 que o eucalipto possui uma massa específica aparente muito menor que a do caroço do fruto do tucumã. Isso deve estar associado à porosidade das biomassas, como poderá ser visto no item de morfologia (item 3.5.6).

A massa específica aparente da areia foi determinada por Santos (1997), através do método de picnometria. O método consiste na determinação da massa específica a partir do deslocamento de volume de um fluido, causado pela adição de uma massa de sólido. O experimento foi realizado em triplicata, utilizando água como fluido.

3.5.3.2 Massa específica real

A massa específica real das biomassas e do inerte foi determinada usando um picnômetro a gás hélio (Micromeritics, AccuPyc 1330, Estados Unidos, 1997), pertencente ao Laboratório de Análises e Calibrações de Produtos e Processos, da FEQ/UNICAMP. O equipamento é composto por uma célula de $11,9494 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ e configurado para trabalhar a uma pressão de enchimento de 19,5 psig (130 MPa). As características dos materiais particulados estão descritas na Tabela 3.5.

Antes de cada análise, a amostra de material foi submetida a vinte purgas, para retirada de ar existente na célula. O equipamento realiza dez medições de massa específica sobre cada amostra, sendo o valor final a média entre elas.

As massas dos materiais foram pesadas previamente em uma balança (Gehaka, AG200, Brasil, 0,00005g) e o volume do sólido determinado através da Equação 3.9, sendo a massa específica obtida como a razão entre a massa (m_a) e o volume dos sólidos (Equação 3.10):

$$V_s = V_c - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (3.9)$$

$$\rho_s = \frac{m_a}{V_s} \quad (3.10)$$

onde:

ρ_s : massa específica real (kg/m³);

V_s : volume ocupado pelo sólido (m³);

V_c : volume da câmara da amostra (m³);

V_e : volume da câmara de expansão (m³);

m_a : massa da amostra (kg)

P_1 : pressão de enchimento da amostra (19,5 psig);

P_2 : pressão após a abertura da válvula de expansão da bomba (psig).

Tabela 3.5 Resultados obtidos nos ensaios de picnometria a gás

Material Sólido	\bar{d}_p (µm)	m_a (kg)	V_s (m ³)	ρ_s (kg/m ³)
Areia	331,58 ± 1,10	13,29 x10 ⁻³ ± 5x10 ⁻⁸	5,00x10 ⁻⁶ ± 1,6x10 ⁻⁹	2656,71 ± 0,85
	508,73 ± 2,29	1,12 x10 ⁻³ ± 5x10 ⁻⁸	7,08x10 ⁻⁷ ± 1,80x10 ⁻⁹	1575,95 ± 4,00
Eucalipto	986,67 ± 4,50	1,13 x10 ⁻³ ± 5x10 ⁻⁸	7,16 x10 ⁻⁷ ± 1,70x10 ⁻⁹	1571,87 ± 3,73
	1993,71 ± 9,89	1,13 x10 ⁻³ ± 5x10 ⁻⁸	6,70 x10 ⁻⁷ ± 2,28x10 ⁻⁹	1503,72 ± 5,10
Tucumã	502,47 ± 1,68	4,50 x10 ⁻³ ± 5x10 ⁻⁸	3,12x10 ⁻⁶ ± 3,83x10 ⁻⁹	1442,59 ± 1,77
	1017,46 ± 0,97	5,28 x10 ⁻³ ± 5x10 ⁻⁸	3,70x10 ⁻⁶ ± 1,8x10 ⁻⁹	1428,34 ± 0,70
	2017,37 ± 7,36	6,00 x10 ⁻³ ± 5x10 ⁻⁸	4,21x10 ⁻⁶ ± 1,95x10 ⁻⁹	1424,61 ± 0,66

3.5.4 Porosidade da partícula

A porosidade das biomassas foi determinada através da Equação 3.11 (BASU, 2010), a qual relaciona as massas específicas, aparente (ρ_p) e real (ρ_s).

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (3.11)$$

Os resultados obtidos estão listados na Tabela 4.1, onde se observa alta porosidade de partícula de eucalipto (0,75) em relação ao caroço do fruto do tucumã (0,23). Esta informação

corroborar com a estrutura de cada material que será discutida no item 3.5.6. A porosidade da areia foi bastante baixa (0,0078), correspondendo a um material não poroso.

3.5.5 Distribuição do diâmetro de poros

A distribuição do tamanho de poros das amostras de biomassas foi determinada no mesmo equipamento utilizado para a determinação da massa específica aparente (item 3.5.3.1), mediante uma pressão 5000 Psi (limite do equipamento), fazendo com que o mercúrio penetrasse no interior das amostras. A Figura 3.12 mostra a evolução do volume de intrusão acumulado de mercúrio, em função do diâmetro de poros presente nas amostras de eucalipto e caroço do fruto do tucumã. Observa-se que as faixas de diâmetro de poros estão entre: $0,075 \mu\text{m} < d_{\text{poros}} < 20 \mu\text{m}$ para o eucalipto e $0,15 \mu\text{m} < d_{\text{poros}} < 20 \mu\text{m}$ para o tucumã, obtendo assim diâmetros de poros correspondentes a $0,6 \mu\text{m}$ e $1,3 \mu\text{m}$, respectivamente.

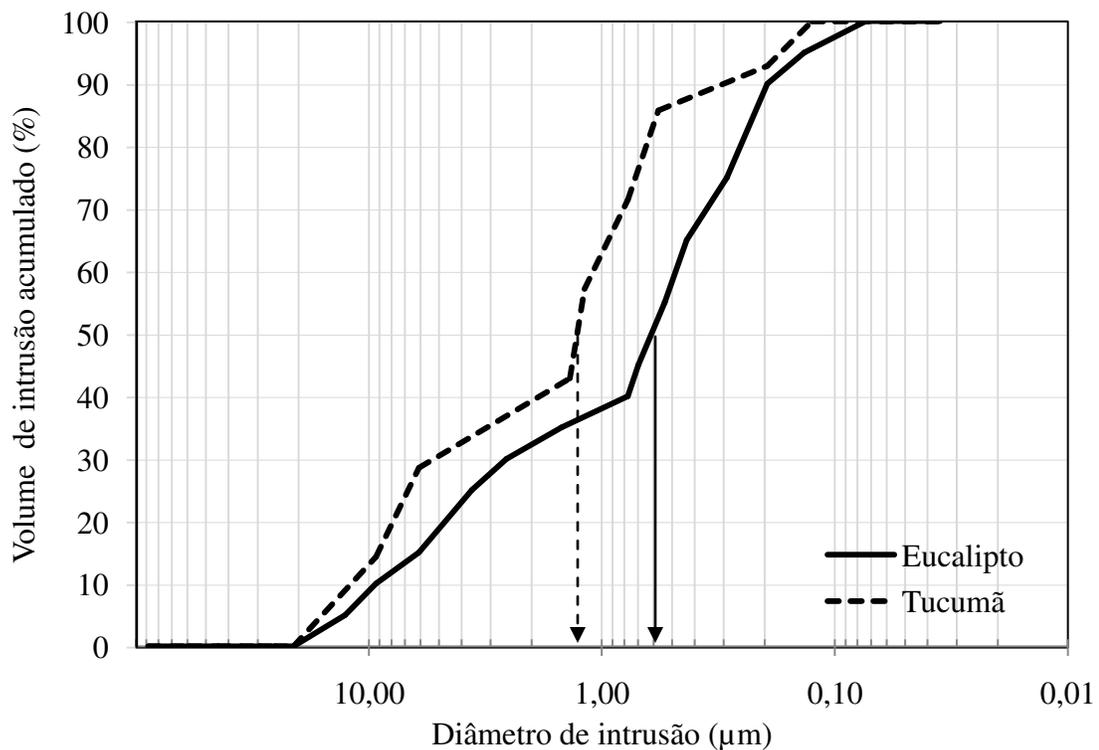


Figura 3.12 Evolução do volume de intrusão acumulado de mercúrio em função do diâmetro de poros

3.5.6 Análise morfológica

3.5.6.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A estrutura dos materiais foi avaliada usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Leica, LEO 440i, Inglaterra) pertencente ao LRAC/FEQ/UNICAMP.

As amostras do caroço do fruto de tucumã e de eucalipto, após sua preparação, foram submetidas a um recobrimento com ouro em um metalizador (Polaron, Sputter Coater SC7620, Inglaterra), a fim de torná-las condutoras. Após este procedimento, as amostras foram analisadas pelo MEV, onde foi aplicada uma tensão de 15 kV e corrente de feixe igual a 100 pA para obtenção das micrografias.

As amostras de eucalipto foram analisadas nas formas moídas e cortadas:

- (a) Moídas: moídos em moinho de martelo e analisados após a seleção por peneiramento.
- (b) Cortadas: os materiais sofreram cortes nas direções radiais, axiais e transversais, utilizando-se uma lâmina fina e afiada.

Para o caroço do fruto do tucumã, as amostras foram analisadas na forma moída e em pedaços. Para esta última forma, a amostra foi quebrada cuidadosamente com um martelo, para que coubesse no porta-amostra do MEV (~1cm²) a fim de verificar sua estrutura interna e externa.

3.5.6.2 Microscopia de luz

A fim de visualizar as estruturas das biomassas em um maior nível de detalhamento, decidiu-se usar um microscópio de luz (Olympus, BX51, Japão) pertencente ao Departamento de Biologia Vegetal do Instituto de Biologia da Unicamp, de responsabilidade da Prof.^a Dr.^a Sandra Maria Carmello-Guerreiro.

Para análise neste microscópio, as biomassas, eucalipto e caroço do fruto do tucumã, foram seccionadas em lâminas de 40 µm e 55 µm, respectivamente, utilizando um micrótomo rotativo (Leica, SM2010R, Alemanha), representado na Figura 3.13.

Após a escolha das seções de melhor qualidade dos cortes, estas foram clarificadas com hipoclorito de sódio 20 %, lavadas em água destilada e submetidas à dupla coloração com uma solução chamada safrablau (5 ml de solução aquosa de safranina 1 %, 95 ml de solução aquosa de

azul de Astra à 1 % e 2 gotas de ácido acético glacial). Após este procedimento, as amostras foram montadas em gelatina glicerinada sob uma lâmina de vidro (KRAUS; ARDUIN, 1997).

Com as lâminas montadas, as mesmas puderam ser analisadas no microscópio, e as imagens capturadas em uma câmera digital (DP Controller, Olympus, Japão), acoplada ao microscópio.



Figura 3.13 Micrótomo utilizado para os cortes de biomassas

3.6 Estudo do comportamento fluidodinâmico de partículas homogêneas e heterogêneas

3.6.1 Escolha dos intervalos granulométricos

As faixas granulométricas escolhidas para as biomassas e o inerte foram baseadas na classificação de Geldart (1986), sendo os materiais escolhidos de acordo com as classes dos materiais aeráveis (grupo A), fluidizáveis (grupo B) e jorráveis (grupo D), como mostrado na Figura 3.14. Para as biomassas, foram escolhidos os diâmetros médios de peneira de 510 μm , 1015 μm e 2030 μm e, para o inerte, 359 μm . A base para esta escolha deve-se a aplicabilidade dos materiais destes grupos em leitos fluidizados borbulhantes e jorráveis (GELDART, 1986), sendo neste trabalho analisada a influência destes materiais em misturas.

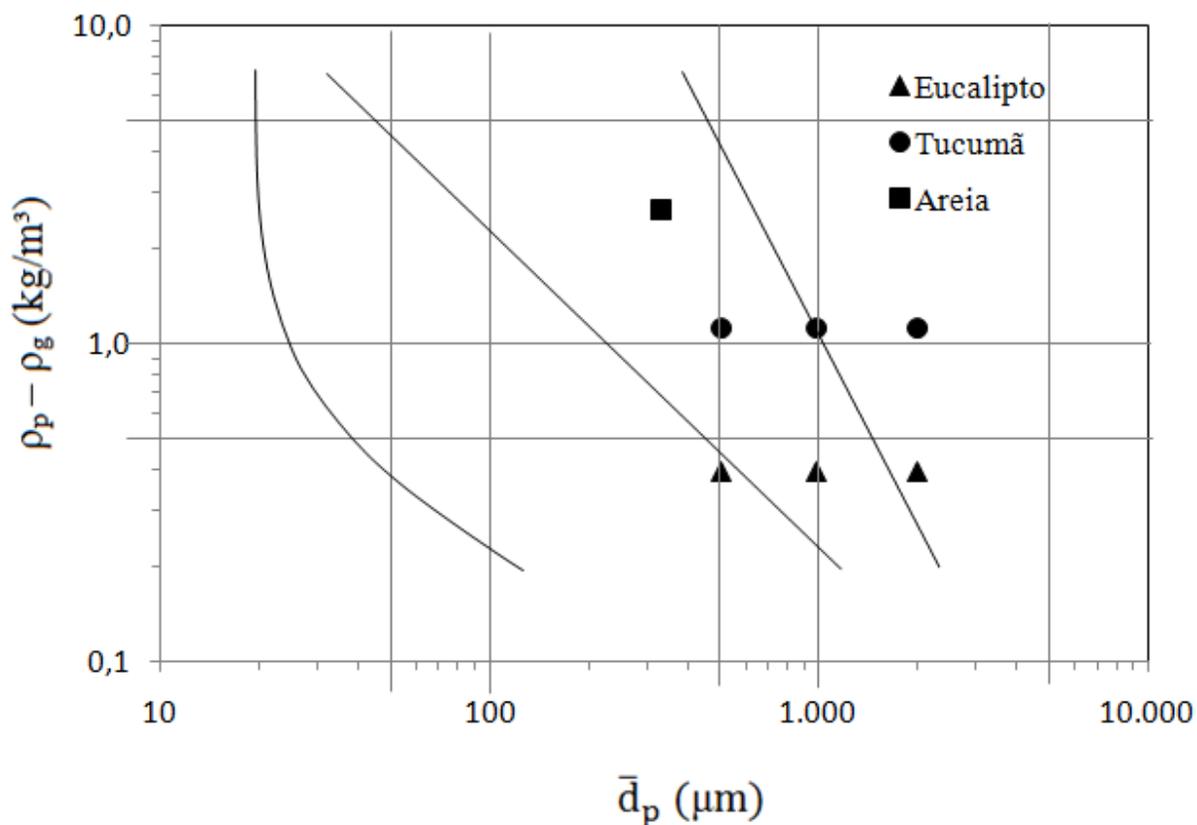


Figura 3.14 Classificação de materiais sólidos de acordo com o critério de Geldart (1986)

3.6.2 Equipamento

O estudo fluidodinâmico de partículas homogêneas e heterogêneas (misturas binárias) foram realizadas no LaProM/FEQ/UNICAMP, usando a montagem experimental ilustrada na Figura 3.15.

O equipamento consistiu em uma coluna de acrílico, cilíndrica, de diâmetro interno de 0,092 m. A coluna apresenta altura de 2 m, a partir do distribuidor, divididos em seções retas circulares de 0,5 m. Como distribuidor foi utilizado placa perfurada (5,89% de área livre) em aço inoxidável. Este foi colocado entre a coluna e o *plenum* (caixa construída em aço inoxidável, diâmetro interno de 0,0967 m e externo de 0,10 m), tendo entre a placa e o *plenum* uma tela de aço inoxidável de 400 mesh para evitar a queda de sólidos na tubulação.

Um soprador radial (Elétrica Ampéres S.A, S1SS M2, BR) com potência máxima de 7,5 CV foi utilizado para obter ar comprimido dentro da coluna. A temperatura do ar foi reduzida com a utilização de um trocador de calor do tipo placa e tubo construído na FEQ/UNICAMP, usando água como fluido refrigerante, para manter a temperatura ambiente no leito fluidizado.

Um ciclone do tipo Lapple (0,10 m DI) e um filtro de tecido (algodão) foram acoplados na saída da coluna a fim de reter o material particulado arrastado pela corrente de ar.

As medidas de temperatura e umidade no interior do leito foram obtidas através de um termo-higrômetro digital (Incoterm, 9680, Brasil). As vazões volumétricas foram determinadas através de rotômetros de diferentes escalas: de 0 Nm³/h a 1 Nm³/h (OMEL S.A., 3P5 – 0402 V 01 X 04, Brasil, 0,5%), 0 Nm³/h a 10 Nm³/h (OMEL S.A., 4P5 – 0903 V 01 X 01, Brasil, 0,5%) e de 10 Nm³/h a 100 Nm³/h ((OMEL S.A., 4T7 – 1306 X 12, Brasil, 0,5%), os quais foram utilizados de acordo com a vazão requerida para a fluidização das misturas.

Transdutores de pressão diferencial do tipo membrana (Aschroft, XLdp, Estados Unidos, 1%) transmitiram sinais de voltagem para um sistema de aquisição de dados com frequência de 200 Hz. Os dados foram tratados através de um programa (Keithley, Easyest LX, EUA), o qual calcula a queda de pressão total e o desvio padrão das flutuações de pressão.

As alturas do leito fixo e expandidas foram medidas com auxílio de uma escala milimétrica, fixada na parede da coluna.

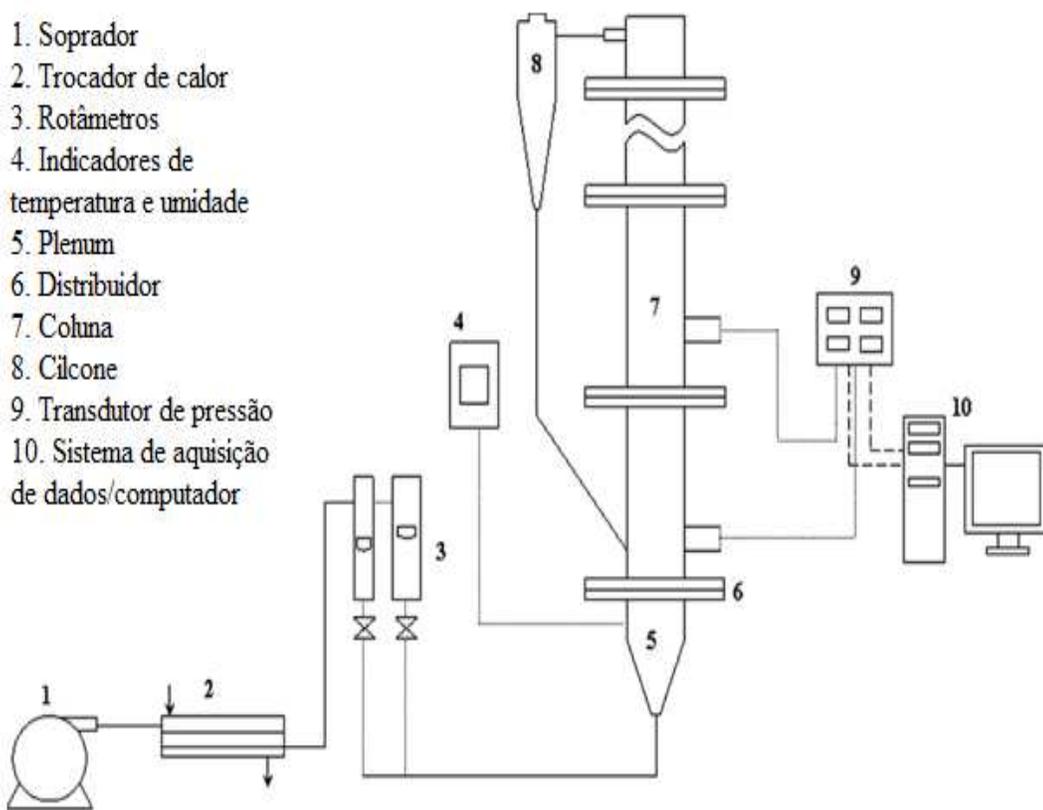


Figura 3.15 Esquema da montagem experimental utilizado (TANNOUS *et al.*, 2008)

3.6.3 Procedimento experimental

Para a análise fluidodinâmica de partículas heterogêneas, foi utilizado um leito composto por inerte (areia) cuja massa de referência foi de 800 g. A este leito foram adicionadas 40 g, 80 g, 120 g e 160 g de biomassa (eucalipto e caroço do fruto do tucumã), formando razões de fração mássica entre biomassa e inerte de 5 %, 10 %, 15 % e 20 %, respectivamente.

Todos os experimentos com partículas homogêneas (inerte puro) e heterogêneas (misturas binárias) foram analisados de forma qualitativa e quantitativa à velocidade superficial do gás à vazão decrescente, avaliando as seguintes evoluções:

- Queda de pressão total através do leito;
- Desvio padrão das flutuações de pressão total;
- Expansão do leito;
- Observações visuais e registro de imagens por câmera digital.

Para o caso de partículas homogêneas (inerte) determinou-se a velocidade e porosidade de mínima fluidização (U_{mf} e ϵ_{mf}), as quais caracterizam a passagem do estado fixo ao fluidizado, isto é, a suspensão das partículas pela força gasosa.

Para as misturas, foram aplicadas as definições de velocidades características de partículas heterogêneas (MOURAD *et al.*, 1994; TANNOUS, 1993):

- Velocidade de fluidização inicial (U_{fi}): corresponde ao primeiro movimento das partículas no leito;
- Velocidade de fluidização aparente (U_{fa}): entre a velocidade de fluidização inicial e a de segregação, definida na sequência, determinou-se a velocidade de fluidização aparente, caracterizada como a velocidade de mínima fluidização das partículas heterogêneas e correspondente a passagem do leito fixo ao fluidizado.
- Velocidade de segregação (U_s): corresponde a aparição de uma zona defluidizada, na superfície do leito, constituída de partículas grandes e de menor densidade;
- Velocidade de fluidização completa (U_{fc}): define-se a velocidade na qual o leito apresenta-se em estado fluidizado. Para as duas biomassas, esta velocidade foi considerada a de sustentação completa da biomassa pelo inerte. Para a grande maioria dos experimentos realizados, o leito encontrava-se em estado

empistonado, sendo de maior intensidade para o caso das misturas eucalipto/inerte.

Estas velocidades são limitantes dos estados de mistura e segregação do leito, consideradas como (MOURAD *et al.*, 1994; TANNOUS, 1993):

- Leito fixo ($U < U_{fi}$): início da fluidização do menor diâmetro de partícula e alta massa específica (inerte) (Figura 3.16a);
- Segregação total ($U_{fi} < U < U_S$); corresponde ao aparecimento de alta concentração de biomassa no topo do leito, constituída essencialmente pelas maiores partículas e baixa massa específica (Figura 3.16b);
- Segregação parcial ($U_S < U < U_{fc}$); velocidade correspondente à suspensão de poucas partículas de biomassa no topo do leito, mas em movimentação constante provocada pelo fluxo de bolhas das partículas de inerte presente na base do leito (Figura 3.16c);
- Fluidização completa ($U > U_{fc}$): mistura efetiva entre a biomassa e o inerte (Figura 3.16d).

Considerou-se ainda a velocidade de fluidização aparente, denominada como a intersecção do leito fixo e fluidizado, comumente aplicada para leitos de partículas homogêneas.



(a) $U_{fi} = 0,13$ m/s

(b) $U_{fa} = 0,15$ m/s

(c) $U_S = 0,41$ m/s

(d) $U_{fc} = 0,68$ m/s

Figura 3.16 Estados fluidodinâmicos característicos de mistura binária: (a) Leito fixo; (b) Segregação total; (c) Segregação parcial e (d) Fluidização completa (mistura eucalipto/areia, $\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$, $\chi = 15\%$)

3.6.4 Metodologias utilizadas para a determinação de diferentes velocidades características

As velocidades características dos leitos constituídos de partículas homogêneas e heterogêneas foram determinadas através dos métodos de queda de pressão e desvio padrão totais das flutuações de pressão, complementados de forma qualitativa por observações visuais. Os valores finais das velocidades características foram considerados a média dos valores obtidos através destas duas metodologias.

A título de exemplo, será apresentada a evolução da queda de pressão e do desvio padrão total das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás para o leito composto por partículas homogêneas (apenas areia) e para o caso mais extremo de mistura avaliado neste trabalho, para o diâmetro médio de Sauter de aproximadamente 2000 μm e razão da fração de fração mássica de 20 %.

Esquemas da evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás, a vazão decrescente, estão mostrados para partículas homogêneas e heterogêneas, referente ao inerte e as misturas binárias eucalipto/inerte e tucumã/inerte, respectivamente, na Figura 3.17. Ressaltam-se suas diferenças significativas entre as propriedades físicas (Tabela 4.1), acarretando um comportamento fluidodinâmico diferenciado.

Inicialmente apresenta-se a evolução da queda de pressão do leito composto apenas pelo inerte (Figura 3.17), onde se define claramente a U_{mf} como o ponto de intersecção do leito fixo, em uma região de crescimento linear da queda de pressão ($Re_{mf} < 10$), com a linha de leito fluidizado (queda de pressão constante).

Para o leito composto por partículas heterogêneas, na Figura 3.17, observa-se que acima de uma velocidade crítica, denominada de velocidade de fluidização completa (U_{fc}), a queda de pressão permanece constante e igual ao peso aparente do leito por unidade de seção transversal da coluna. Pelas observações visuais, nesta velocidade, o leito de inerte sustenta a biomassa, mantendo esta fluidizada na parte superior do leito.

Entre a velocidade de fluidização completa e uma velocidade chamada de velocidade de segregação (U_s), ocorre uma diminuição da queda de pressão, provocada pelo arranjo das partículas de biomassa no leito, as quais se deslocam para a parte superior deste.

Abaixo desta velocidade, a queda de pressão permanece praticamente constante, até encontrar a velocidade de fluidização aparente, considerada a velocidade mínima de fluidização das misturas. Esta velocidade é considerada como a intersecção entre o patamar da queda de

pressão constante e a reta correspondente ao estado de leito fixo. Esta velocidade é comparada com a velocidade de mínima fluidização de partículas homogêneas.

Abaixo desta velocidade, encontra-se a velocidade de fluidização inicial, como sendo a velocidade na qual as partículas iniciam seu movimento na superfície do leito, para a velocidade crescente, ou o limite da reta correspondente ao início do estado fixo do leito para velocidade decrescente. Salienta-se que este ponto corresponde ao início da fluidização da partícula de menor diâmetro e maior massa específica.

Na Figura 3.18 apresenta-se o perfil da evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás à vazão decrescente. Observa-se que nas abscissas, os pontos de inflexão correspondentes às velocidades características de fluidização inicial, aparente, segregação e completa. Assim, estas grandezas definem as quatro regiões de misturas definidas no item 3.6.3.

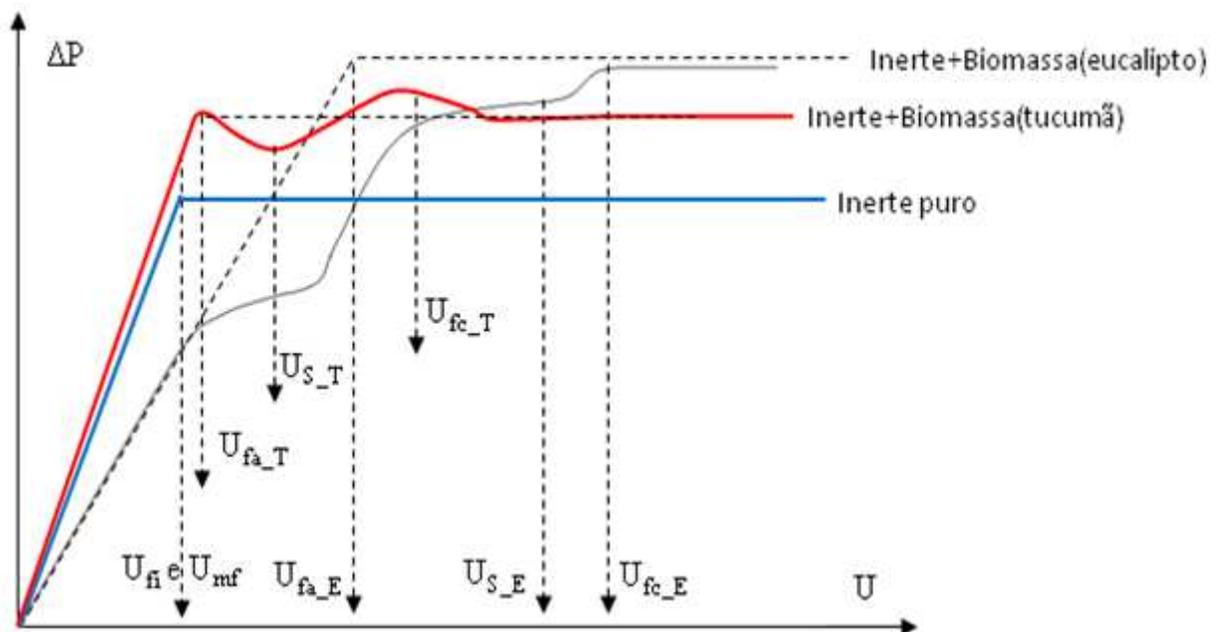


Figura 3.17 Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás para leitos de partículas homogêneas e heterogêneas

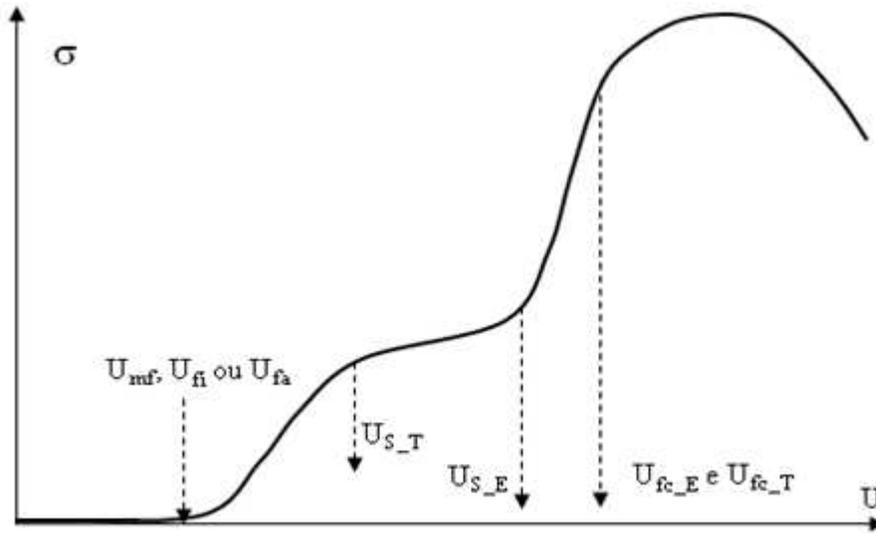


Figura 3.18 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás para leitos de partículas homogêneas e heterogêneas

3.6.5 Expansão do leito e porosidades características de mistura

A expansão do leito foi definida como a relação entre o volume de vazios combinados entre biomassa e inerte e o volume total da mistura, para cada velocidade superficial do gás, calculada de acordo com a Equação 3.12 (THONGLIMP *et al.*, 1984; TANNOUS; MIZONOV, 2009):

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{A_c H_l} \left(\frac{m_b}{\rho_{p,b}} + \frac{m_i}{\rho_{p,i}} \right) \quad (3.12)$$

onde:

ε : expansão do leito

A_c : a área da seção transversal da coluna (m²)

H_l : altura média alcançada pelo leito (m)

m_b, m_i : massa de biomassa e massa de inerte (kg)

$\rho_{p,b}, \rho_{p,i}$: massa específica aparente de biomassa e inerte, respectivamente (kg/m³)

A altura média do leito expandido, considerada na Equação 3.12, foi determinada pela média aritmética entre a altura mínima e máxima do leito, medida através de uma escala milimétrica fixada à coluna do leito.

A título de exemplo, na Figura 3.19 apresenta-se a evolução das alturas máxima e mínima, em função da velocidade superficial do gás, para a mistura eucalipto/areia de $1993,71 \mu\text{m}$ de diâmetro. Observa-se que para velocidades à $2 \times U_{fa}$, a amplitude da altura do leito torna-se significativa, sendo esta 2,5 vezes superior ao valor da altura do leito na fluidização aparente.

As porosidades características, aparente (ε_{fa}) e completa (ε_{fc}), foram determinadas através do método de expansão do leito, levando em consideração às velocidades características associadas, conforme exemplificado na Figura 3.20.

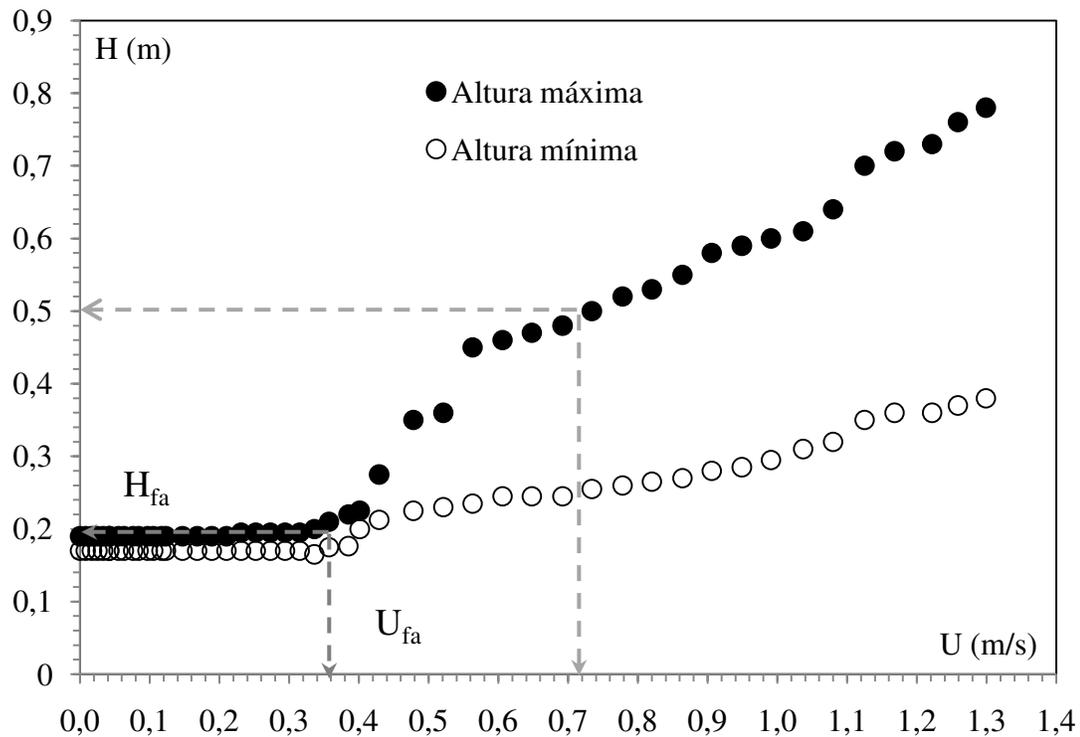


Figura 3.19 Evolução da altura do leito em função da velocidade superficial do gás (mistura eucalipto/areia, $\bar{d}_p = 1993,71 \mu\text{m}$, $\chi = 20\%$)

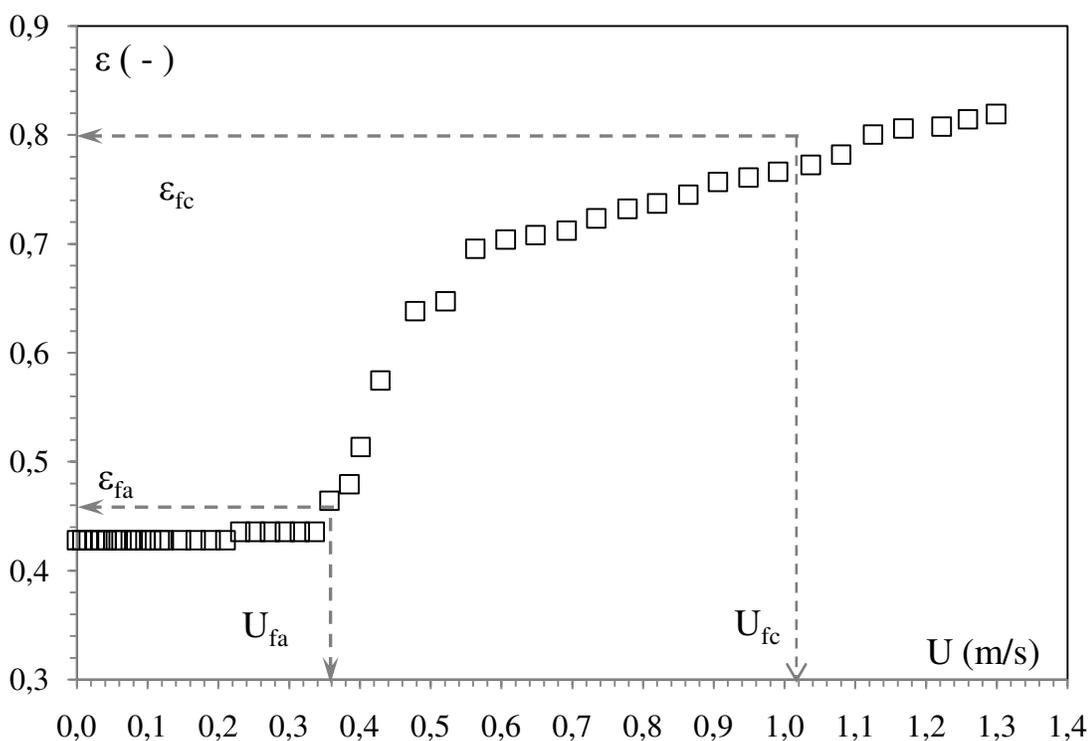


Figura 3.20 Expansão do leito em função da velocidade superficial do gás e representação das porosidades características – aparente e completa (mistura eucalipto/areia, $\bar{d}_p = 1993,71 \mu\text{m}$, $\chi = 20\%$)

3.7 Análise química

3.7.1 Análise elementar CHN-S

O teor de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) presente nas biomassas foi determinado por análise elementar (Perkin-Elmer, 2400 CHN Series II, Estados Unidos, $\pm 0,3\%$) na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo.

Amostras de 1 mg de biomassa foram pesadas em uma balança analítica (Perkin-Elmer, AD6, Estados Unidos, 0,0000005 g) as quais foram colocadas no analisador, onde ocorreu a combustão dos materiais a 925°C na presença de oxigênio puro. Todo o carbono passou para a forma de CO₂, o hidrogênio para a forma de H₂O e o nitrogênio para a forma de vários óxidos (N_xO_x) que, ao passar por uma coluna contendo cobre metálico, foram reduzidos a N₂. Estes gases (CO₂, H₂O e N₂) foram arrastados por uma corrente de gás hélio puro (99,9999% de pureza), homogeneizados e, posteriormente, separados em colunas específicas empacotadas com sílica, e

detectados de acordo com a condutividade térmica de cada material (Perkin-Elmer, Estados Unidos).

Para a determinação de enxofre (TS), amostras de 15 mg foram utilizadas, as quais foram queimadas em frasco de *Schöniger*, hermeticamente fechado, com elevada concentração de oxigênio, e com uma quantidade de água na base do frasco, onde o enxofre passou a forma de SO₄. O frasco foi mantido fechado durante um período de 3 horas, para que todo o SO₄ formado fosse absorvido nesta água (líquido absorvente). Esta solução foi então pulverizada em um equipamento de espectrometria de emissão atômica com plasma induzido - ICP-AES (Spectro, Arcos SOP, Estados Unidos, $\pm 0,1\%$), onde os íons da amostra foram excitados e liberaram energia com intensidade característica para o enxofre. Através de uma curva de calibração com padrão certificado na para enxofre (TS), definida em função da intensidade luminosa, definiu-se a concentração deste elemento amostra.

3.7.2 Composição química

A composição química foi analisada mediante a determinação dos teores dos elementos constituintes da parede celular das biomassas. Através do método de Kamisaka (1990), foram determinados os teores de pectina, hemicelulose e celulose, e pelo método de Klason (BOYES *et al.*, 2001), o teor de lignina. Todas as determinações foram realizadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal, do Instituto de Biologia da UNICAMP.

3.7.2.1 Determinação dos teores de e pectina, hemicelulose e celulose

O método de Kamisaka (1990) consiste na separação dos componentes químicos da parede celular das biomassas por extração, sendo a pectina o primeiro composto e em seguida a hemicelulose e a celulose. Em cada extração, o componente de interesse fica na solução sobrenadante, sendo sua concentração determinada por espectrofotometria, enquanto no sólido ficam as frações dos componentes ainda não determinados.

Três amostras de 450 mg de biomassa foram utilizadas, das quais foram feitas triplicatas, de 150 mg cada (m_a). A média de cada análise, portanto, foi realizada a partir de nove experimentos, devido à instabilidade do método.

Inicialmente, as biomassas foram finamente moídas em um moinho de bolas (Marconi, Brasil). O pó resultante foi então homogeneizado com água gelada (5 ml), em um vortex (Velp

Scientífica, ZX3F20230176, Itália), sendo posteriormente centrifugado por 10 min à frequência de $1000 \times g$. As amostras resultantes foram lavadas com três solventes: 5ml de água, 5ml de acetona e, finalmente, uma mistura metanol/clorofórmio 1/1 (v/v). A mistura formada foi centrifugada, gerando um novo material sólido, o qual foi deixado secar por 1 dia, dentro de uma capela, em condições ambientes.

Para remover o amido deste sólido resultante, este foi submetido a uma temperatura de 37°C, por 3 h, em uma solução contendo 5 ml de R-amilase pancreática (Sigma Chemical Co, tipo I-A, EUA, 2 unidades/ml) e 0,1 M da solução tampão de acetato de sódio (pH = 6,5). Esta solução foi centrifugada e o sedimento recuperado, enquanto o amido foi retirado junto com a solução sobrenadante.

Sobre o sedimento recuperado, foram realizadas três extrações, utilizando 3 ml de solução de oxalato de amônio 20 mM (pH = 4), sendo que para cada repetição a mistura foi mantida a 70°C, por 1 h. Deste processo extraiu-se a fração de pectina, a qual ficou no líquido sobrenadante, em uma mistura pectina-oxalato, resultando em um volume de solução final (VSF) de 9 ml.

Sobre o resíduo do processo acima, foi realizada uma extração com 3 ml de NaOH (0,1 M), a temperatura ambiente, sendo esta mistura colocada em um dessecador, sobre vácuo. O material resultante foi centrifugado para obtenção da primeira extração de hemicelulose (hemicelulose solúvel), a qual ficou diluída no líquido sobrenadante, em um VSF de 3 ml.

Os resíduos insolúveis foram extraídos duas vezes com 2 ml de solução de NaOH 17,5 % (m/v), e esta solução ficou mantida por um período de 8 h dentro de um dessecador a vácuo. Após centrifugação, obteve-se a segunda extração da hemicelulose (hemicelulose insolúvel), com VSF de 4 ml. A soma das duas extrações corresponde ao teor total de hemicelulose na biomassa.

O sólido resultante foi lavado com 5 ml de água destilada, 5 ml de solução 1 mM de ácido acético e 5 ml de etanol, e então seca a 37°C. Esta fração foi dissolvida em 5 ml de H₂SO₄ (72%) por duas horas, a temperatura ambiente, e então diluída 30 vezes com água destilada, para obtenção da fração de celulose, resultando em um VSF de 150 ml .

A concentração final de celulose, hemicelulose e lignina, em cada solução diluída, foi determinada de acordo com o método de ácido fenol-sulfúrico (DUBOIS, 1956), usando a glicose como padrão, em um espectrofotômetro UV Visível (Femto, Modelo 600, Brasil). O método baseia-se na propriedade de que açúcares simples, polissacarídeos e seus derivados, produzem uma cor amarelo-alaranjado, quando tratadas com fenol e ácido sulfúrico concentrado.

Alíquotas das soluções (AS) contendo as frações dos compostos analisados foram separadas e colocadas em tubos de ensaio. Foram coletadas alíquotas de 350 µl da solução contendo pectina, 10 µl, da solução contendo celulose, 20 µl da solução contendo a fração de hemicelulose solúvel e 20 µl da solução contendo a fração de hemicelulose insolúvel. Cada tubo de ensaio foi completado com água, até que o volume de todos os tubos fosse de 500 µl. Em seguida, foram adicionados 500 µl de solução de fenol (5 %) e 2 ml de H₂SO₄, sendo as amostras homogeneizadas com leve agitação manual.

Após a adição de todos os reagentes, aguardou-se 10 min e os tubos de ensaio foram novamente agitados e colocados em um banho de água a temperatura de 25°C, antes das medidas serem feitas. A absorbância de cada solução foi medida em 490 nm, sendo o “branco” considerado a solução onde os polissacarídeos estão dissolvidos: oxalato de amônio 20 mM para a pectina, água para a celulose, NaOH (0,1 M) para a hemicelulose solúvel e NaOH 17,5% (m/v) para a hemicelulose insolúvel.

Uma curva de calibração foi construída, com base na variação da absorbância com a massa de glicose (APÊNDICE A), fornecendo a Equação 3.13, obtida pelo ajuste da curva, sendo a abscissa do gráfico a absorbância e a ordenada a massa de glicose. Os valores das abscissas foram substituídos pelas absorbâncias de cada soluções medida, fornecendo a massa de cada polissacarídeo:

$$m_{ps} (\mu g) = 47,063A - 1,5157 \quad (3.13)$$

onde:

m_{ps} : massa do polissacarídeo, determinada para a glicose, pectina, hemicelulose e celulose, a partir dos dados da curva de glicose (µg)

A: absorbância (-)

A partir destes dados, a concentração dos polissacarídeos na amostra foi determinada através da Equação 3.14:

$$C_p = \left(\frac{m_{ps} \times VSF}{m_a \times AS \times 10} \right) \quad (3.14)$$

Onde:

C_p = concentração do polissacarídeo (% mássica)

m_{ps} = massa de polissacarídeo (μg)

m_a = massa de amostra (g)

VSF = volume de solução final onde o polissacarídeo ficou dissolvido (ml)

AS = alíquota de solução utilizada na análise (ml)

3.7.2.2 Determinação do teor de lignina

Para a determinação do teor de lignina, foi empregado o método de Klason, sendo o mais comum para esta análise. As amostras foram coletadas, congeladas em nitrogênio líquido e liofilizadas (Liotop, L101, Brasil). Após este procedimento, estas amostras foram finamente moídas em moinho de bolas (Marconi, Brasil). Pouco mais de 0,2 g desse material foi colocado em Soxhlet e extraído com 500 ml de acetona por 8 h, para remoção de componentes que poderiam formar pseudolignina durante a análise pelo método. O material resultante foi seco em temperatura ambiente, dentro de uma capela.

Para avaliar o teor de lignina, foram utilizadas 0,2 g da amostra obtida ao final do processo descrito acima, considerada como a massa seca (m_s), aos quais foram adicionados 3 ml de H_2SO_4 , em frascos de vidro 15 ml, com tampas de teflon. Os frascos foram agitados em vórtex (Velp Científica, ZX3F20230176, Itália), por 1 min, e posteriormente colocados em gelo, para conservar a amostra.

Os frascos acima foram então postos em banho Maria, a temperatura de 20°C, e agitado a cada 10 min por 1 min no vortex. A esta etapa dá-se o nome de hidrólise, com duração de 2 h.

Na sequência, a solução acima foi transferida para tubos de 125 ml, aos quais foram adicionados 112 ml de água deionizada e purificada (água MilliQ). O material foi selado e então colocado em autoclave (Phoenix, AV75, Brasil) por 60 min a 121°C.

Após este procedimento, as amostras foram resfriadas, a temperatura ambiente, e os hidrolisados filtrados a vácuo, em filtros de microfibras de vidro (secos a 105°C, por 24 h, em estufa e guardados em dessecador), lavados com 200 ml de água MilliQ pré-aquecida a 50°C, para remoção dos resíduos de ácidos e açúcares. Do líquido resultante, separou-se 5 ml de amostra, a qual tem sua absorvância lida em 205 nm, determinando-se o teor de lignina solúvel através da Equação 3.15:

$$C_l = \left(\frac{A}{B \times A_b} \right) dx \frac{VSF}{10m_s} \quad (3.15)$$

onde:

C_l = concentração de lignina (% mássica)

A = absorvância (-)

B = comprimento da cubeta (1 cm)

A_b = absorvidade, igual a 110 l/g cm

d = fator de diluição, igual a 50

VSF = volume da solução final onde o polissacarídeo ficou retido (ml)

m_s = massa seca (g)

O sólido retido no filtro foi seco em estufa por 24 h, a 105°C, dentro de placas de petri, sendo a massa ao final deste processo determinada e registrada como a massa de lignina insolúvel.

3.8 Análises térmicas

O potencial de um combustível pode ser avaliado mediante suas características térmicas, sendo estas: análise imediata e poder calorífico. Além disso, a decomposição térmica da biomassa auxilia no reconhecimento das perdas de massa em função da temperatura aplicada sobre as amostras. A seguir, apresentam-se as metodologias aplicadas a cada caso.

3.8.1 Análise da decomposição térmica

Para analisar a decomposição térmica das biomassas, utilizou-se uma balança termogravimétrica (Shimadzu, TGA 50, Japão), pertence ao Laboratório de Análise e Caracterização de Produtos e Processos (FEQ/UNICAMP).

As amostras foram colocadas em um porta-amostra de platina e submetidas a uma programação controlada de temperatura, desde a temperatura ambiente até 900°C. A taxa de aquecimento escolhida foi de 10°C/min e massa de amostra de 5 mg para as duas biomassas (eucalipto e caroço de tucumã), de acordo com a proposta de Nascimento e Tannous (2012). O

experimento foi conduzido em uma atmosfera inerte, de nitrogênio, sendo este alimentado a 50 mL/min. As perdas de massa foram obtidas em função da temperatura (TGA), bem como sua derivada (DTG).

3.8.2 Análise imediata das biomassas

Através da análise imediata, foi possível a determinação dos teores de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo das biomassas utilizadas, de acordo com normas específicas. Todos os ensaios foram realizados em duplicata e o valor final corresponde à média das determinações.

3.8.2.1 Determinação do teor de umidade

A umidade presente nas biomassas demanda uma grande parte da energia produzida em uma planta de gaseificação, pois a energia requerida em sua vaporização não é recuperada, sendo este um importante parâmetro de projeto (BASU, 2010).

Para a determinação do teor de umidade utilizou-se uma adaptação à norma ASTM E871-82 (*Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*).

Primeiramente, placas de petri foram secas por 30 minutos em uma estufa (Quimis, Q314M-242, Brasil) aquecida a $103 \pm 1^\circ\text{C}$ e colocadas em dessecador até seus resfriamentos à temperatura ambiente, por cerca de 1 h. Após este procedimento, as massas das placas foram pesadas em balança (Bel Equipamentos Ltda, Classe I, Brasil, 0,00005 g) e registradas como m_c .

Em cada placa de petri da duplicata, 1 g de amostra de biomassa foi adicionada e a massa da placa mais a biomassa foram registradas como m_0 . A quantidade mássica utilizada (1 g) foi uma adaptação (recomendação de 50g), devido à limitação da quantidade de amostra disponível para as análises.

O recipiente contendo a amostra foi colocado em estufa a $103 \pm 1^\circ\text{C}$ por 16 h. Após este período, as amostras foram colocadas em dessecador e resfriadas por cerca de 1 h a temperatura ambiente, sendo posteriormente pesadas. A massa resultante foi registrada como m_f . As amostras retornaram a estufa por mais 2 h, e então foram retiradas novamente, colocadas em dessecador e pesadas após 1 h. Este procedimento foi repetido até a variação de massa ser menor que 0,2 %. O teor de umidade pôde ser determinado a partir da Equação 3.16:

$$TU (\%) = \frac{(m_0 - m_f)}{(m_0 - m_c)} \times 100 \quad (3.16)$$

onde,

m_c = massa da recipiente (placa de petri), em g

m_f = massa final do recipiente com a amostra, em g

m_0 = massa inicial do recipiente com a amostra, em g

3.8.2.2 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas indica o teor de sólidos inorgânicos presentes em uma amostra, após o combustível ser completamente queimado. Seus componentes principais são sílica, alumina, ferro e cálcio (BASU, 2010).

Para a determinação do teor de cinzas utilizou-se a ASTM E 1755 (*Standard Test Method for Ash in Biomass*). Cadinhos de porcelana de 50 ml foram aquecidos em mufla (Indústria Forlabo Ltda, 2231, Brasil) por 3 h a 575°C, sendo posteriormente colocados em um dessecador para resfriamento até temperatura ambiente, quando foram pesados.

Após esta primeira pesagem, os cadinhos retornaram a mufla por 1 h e foram posteriormente retirados para resfriamento em dessecador por 1 h. Este procedimento foi repetido até que a variação de massa não fosse maior que 0,3 mg. Esta massa foi registrada como m_{cont} .

Amostras de 1 g de biomassa, previamente secas, foram utilizadas para a determinação do teor de cinzas. Os cadinhos com as amostras de biomassa foram pesados à temperatura ambiente, sendo esta massa registrada como m_{bc} e colocados em mufla (Indústria Forlabo Ltda, 2231, Brasil) por 3 h. Após o resfriamento em dessecador por uma hora, os recipientes contendo as amostras foram pesados. Este procedimento foi repetido, considerando tempo de permanência de 1 h na mufla, até que a variação de massa de cada amostra fosse menor que 0,3 mg. Com isso, registrou-se a massa como m_{cinzas} .

O teor de cinzas (TCZ) foi determinado de acordo com a Equação 3.17:

$$\% TCZ = [(m_{cinzas} - m_{cont}) / (m_{bc} - m_{cont})] \times 100 \quad (3.17)$$

onde:

m_{cinzas} = massa de cinza na amostra (g)

m_{cont} = massa do cadinho seco (g)

m_{bc} = massa do cadinho + biomassa (g)

3.8.2.3 Determinação do teor de materiais voláteis

O teor de voláteis consiste no teor de vapores condensáveis e não condensáveis liberados quando um combustível é aquecido, sendo dependente das taxas de aquecimento e das temperaturas em que isso ocorre (BASU, 2010).

O teor de materiais voláteis foi determinado pela ASTM E872 (*Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*). Cadinhos de porcelana de 50 ml, com tampa, foram utilizados, a fim de simular uma atmosfera inerte, sendo pesados e tiveram suas massas registradas como m_c . Nestes cadinhos foram adicionadas 1 g de biomassa, previamente seca. As massas dos cadinhos com tampa, contendo a amostra de biomassa, foram registradas como m_0 , sendo estes conjuntos posteriormente colocados em mufla (Indústria Forlabo Ltda, 2231, Brasil) por 7 min, a temperatura de 950°C. Após serem resfriados em dessecador a temperatura ambiente por 1 h, os recipientes foram pesados e a massa final foi registrada como m_f . O teor de materiais voláteis (TMV) foi calculado de acordo com a Equação 3.18:

$$TMV (\%) = 100 \times (m_0 - m_f) / (m_0 - m_c) \quad (3.18)$$

onde:

m_c = massa do recipiente (cadinho de porcelana), em g

m_f = massa final do recipiente com a amostra, em g

m_0 = massa inicial do recipiente com a amostra, em g

Para o eucalipto, além da norma descrita acima, foi aplicada ainda a norma ABNT NBR 8112 (1986), destinada a carvão. A variação com relação à norma ASTM E872 consiste na temperatura utilizada, sendo de 850°C pela norma ABNT NBR 8112 (1986).

3.8.2.4 Determinação do teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi obtido como a diferença entre o total da amostra (100%), em base seca, e os teores de cinzas e materiais voláteis:

$$TC (\%) = 100 - TCZ - TMV \quad (3.19)$$

onde:

TC = teor de carbono fixo (%)

TCZ = teor de cinzas (%)

TMV = teor de materiais voláteis (%)

3.8.3 Determinação do poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico de um combustível é definido como a energia liberada na forma de calor durante sua combustão completa. Pode ser definido o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) de um combustível. A diferença entre estes é a energia requerida para evaporar a umidade presente em um combustível.

Neste trabalho, o poder calorífico superior das biomassas foi determinado através da adaptação da norma ASTM D-240 (*Standard Method of Test for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels Bomb Calorimeter*), de acordo com Sánchez (2010). Os testes foram realizados em uma bomba calorimétrica (Analis SA, Bélgica), pertencente à Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

Inicialmente foi realizado um processo de padronização do equipamento, através da determinação do equivalente em água do calorímetro, utilizando ácido benzóico padrão como amostra sendo, para isso, feitas seis repetições. Pastilhas de ácido benzóico com massa entre 0,9 g a 1,1 g foram compactadas, sendo colocado em seu interior cerca de 1 cm de um fio de algodão de comprimento total de 15 cm. Um cadinho de quartzo foi colocado na haste da bomba, o qual serviu de recipiente para a amostra. Um fio de ferro de 12 cm foi utilizado para ignição, sendo este fixado entre as hastes da bomba. O fio de algodão, preso à pastilha, foi então envolvido sobre este fio de ferro. Dentro da bomba, adicionou-se 0,5 ml de água destilada. Com o equipamento montado, o próximo passo foi a pressurização da bomba utilizando oxigênio comercial (mínimo 99,0 %) a 30 bar.

A bomba foi colocada em um recipiente com 2,7 l de água e um agitador foi utilizado para manter a temperatura do banho uniformemente distribuída. A ignição da amostra foi realizada através de garras de ignição presas nos eletrodos da bomba.

Aguardou-se 5 minutos para que a bomba tivesse alcançado equilíbrio. A partir deste momento, as temperaturas começaram a ser anotadas em intervalos de 1 minuto. No início do sexto minuto deu-se a ignição da bomba. A partir deste ponto, as temperaturas foram anotadas em intervalos de 30 segundos. Quando a temperatura da água alcançou um valor constante por 5 minutos, o experimento pôde ser interrompido.

Para o cálculo do equivalente em água do calorímetro (E), usou-se a Equação 3.20:

$$E = \frac{CPxm_{ab} + e_1 + e_2}{T} \quad (3.20)$$

onde:

E: equivalente em água do calorímetro (cal/°C)

m_{ab}: massa do ácido benzóico padrão (g)

CP: poder calorífico do ácido benzóico padrão, cujo valor é 6318 cal/g

e₁: correção para o calor de formação para o ácido nítrico (cal)

e₂: correção para o poder calorífico do fio de ignição (cal)

T: elevação da temperatura corrigida (°C)

A variável e₁ é obtida pela titulação do líquido resultante da lavagem da bomba ao final de um ensaio. Para isto, foi utilizada uma solução de NaCO₃ (3,84 g desta substância em 1 litro de água) e alaranjado de metila como indicador.

O valor de e₂ é 2,7 vezes o valor do comprimento do fio de ignição de ferro consumido no ensaio, em centímetros.

A elevação da temperatura corrigida (T) é determinada pela Equação 3.21:

$$T = T_c - T_a - r_1(t_b - t_a) - r_2(t_c - t_b) \quad (3.21)$$

onde:

T: elevação da temperatura corrigida (°C)

t_a: tempo de ignição (min)

t_b: tempo no qual a temperatura alcançou 60% do total (min)

t_c: tempo no início do período no qual a variação de temperatura com o tempo torna-se constante (min)

T_c: temperatura no tempo c (°C)

T_a: temperatura no tempo a (°C)

r₁: taxa de crescimento da temperatura durante os primeiros 5 minutos antes da ignição (°C/min)

r₂: taxa de variação da temperatura nos últimos 5 minutos dividido pelo tempo (°C/min)

Para a determinação do poder calorífico da biomassa, utilizou-se o mesmo procedimento de confecção da amostra e montagem da bomba utilizada para o ácido benzóico padrão. Os ensaios foram realizados em triplicatas, utilizando o menor diâmetro de partícula empregado neste estudo, de modo a produzir melhores pastilhas de biomassa, com massa de 1,1 g. O poder calorífico da biomassa foi calculado de acordo com a Equação 3.22:

$$PCS = \frac{(Tx E - e_1 - e_2)}{m_b} \quad (3.22)$$

onde:

PCS: poder calorífico superior da biomassa (cal/g)

m_b: massa de biomassa (g)

De forma complementar, o poder calorífico superior do eucalipto e do caroço do fruto do tucumã foi determinado através da Equação de Tillman (1978), a qual leva em consideração o teor de carbono (C), obtido pela análise elementar, sendo esta:

$$PCS_{KJ/kg} = 437,288(C) - 305,869 \quad (3.23)$$

O poder calorífico inferior das biomassas, em base seca, foi determinado através da Equação 3.24, de Mendeleev (1949). Os dados de carbono (C), hidrogênio (H) e enxofre (TS) foram obtidos por análise elementar, e a umidade (W), por análise imediata. O teor de oxigênio

foi obtido como a diferença do total de amostra (100%) e os teores de C, H, TS, por análise elementar e umidade (W) e cinzas, por análise imediata.

$$PCI_{kj/kg} = 338,58C + 1254 H - 108,68 (O - TS) \quad (3.24)$$

onde:

C: teor de carbono (%)

H: teor de hidrogênio (%)

O: teor de oxigênio (%)

TS: teor de enxofre (%)

Capítulo 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais referentes às caracterizações físicas e fluidodinâmicas sobre as misturas - biomassas (madeira de eucalipto e caroço do fruto do tucumã) e inerte (areia) - utilizadas neste trabalho. Além disso, serão apresentados os resultados das análises químicas (composição, análise elementar) e térmicas (decomposição térmica, análise imediata, PCS e PCI), referentes às biomassas.

Para a análise fluidodinâmica, somente as propriedades físicas serão efetivamente utilizadas, sendo apresentadas novamente neste capítulo, a fim de facilitar a visualização dos dados obtidos no Capítulo 3.

4.1 Caracterização física dos sólidos

Na Tabela 4.1 estão apresentados, de forma sucinta, os resultados finais referentes às propriedades físicas dos materiais sólidos utilizados. Estes parâmetros servirão de base para a discussão do comportamento fluidodinâmico das misturas (biomassa e inerte). Um detalhamento maior destas propriedades pode ser visto no Capítulo 3 (item 3.5), agrupados na Tabela 3.1.

Tabela 4.1 Dados experimentais das propriedades físicas dos materiais sólidos

Material sólido	\bar{d}_p (μm)	ρ_p (kg/m^3)	φ (-)	φ (-)	Classificação de Geldart (1986)
			Wadell (1935)	Riley (1941)	
Eucalipto	508,73	394,92	0,36	-	A (aerável)
	986,67		0,41	-	B (fluidizável)
	1993,71		0,50	-	D (jorrável)
Caroço do fruto do tucumã	502,47	1115,01	-	0,81	B (fluidizável)
	1017,46		-	0,85	D (jorrável)
	2017,37		-	0,89	D (jorrável)
Areia	331,59	2636	-	0,85	B (fluidizável)

Os parâmetros escolhidos para a análise fluidodinâmica das biomassas, eucalipto e caroço do tucumã, foram: diâmetros médios de Sauter entre 500 e 2000 μm (aprox.); massas específicas aparente de 395 kg/m^3 e 1115 kg/m^3 e esfericidade de 0,36 - 0,50 e 0,81 - 0,89, respectivamente.

Como pode ser visto na Tabela 4.1, os sólidos são pertencentes aos grupos A, B e D da classificação de Geldart. O inerte tem características de um material fluidizável. Sua esfericidade é semelhante ao caroço do fruto do tucumã. Verifica-se ainda que as esfericidades das biomassas aumentaram em função de seus diâmetros médios de Sauter.

Para o eucalipto, o aumento de diâmetro de 508,73 μm para 1993,71 μm (~ 4 vezes), não foi estendido à dimensão a , responsável pela forma alongada da partícula, que cresceu em 2,5 vezes (Tabela 3.3), beneficiando a esfericidade. Para a mesma faixa de diâmetros, as dimensões b e c , significativamente menores que a , cresceram em 3,5 e 6,9 vezes, respectivamente. Isto pode ser também verificado na Tabela 3.3, através das relações b/a , que aumentam em 25 % e c/a , com um aumento de 133 %. Comparativamente, a esfericidade de uma partícula cúbica, onde as dimensões a , b e c são iguais (mesmo ângulo reto) é de 0,81 (Wadell, 1935).

Para o tucumã, verifica-se que a dimensão b tende a tornar-se mais próxima de a com o aumento do diâmetro, como pode ser visto pela razão de b/a , que aumenta em 20 % com o diâmetro das biomassas, o que torna este material menos alongado, aumentando sua esfericidade.

O diâmetro do inerte não foi variado neste estudo, mas verificou-se uma boa relação entre as dimensões das partículas no diâmetro de 331,59 μm ($b/a = 0,73$), associada a uma elevada esfericidade do material, de 0,85, considerando que 1 significa uma esfera ideal.

4.1.1 Análise morfológica das partículas de biomassa– MEV e microscópio de luz

Eucalipto

Na Figura 4.1 estão exemplificadas as imagens obtidas para as amostras de eucalipto, após a moagem, para os diâmetros de 508,73 μm (Figura 4.1a) e 986,67 μm (Figura 4.1b). As imagens mostram que o eucalipto apresenta células alongadas e retangulares, sendo uma característica determinante da forma das partículas após serem moídas. Isto também corrobora com os baixos valores de esfericidade obtidos para este material, sendo este de 0,36 a 0,50 (Wadell, 1935), para os diâmetros de 508,73 μm a 1993,71 μm , respectivamente.

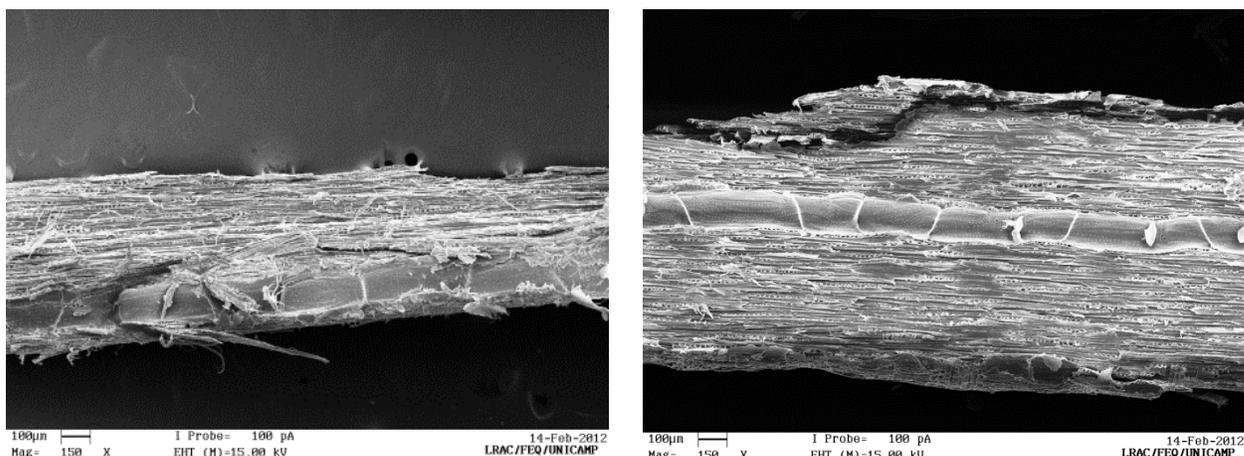
Na Figura 4.2, apresentam-se imagens de amostras de eucalipto para diferentes cortes (transversal, radial e longitudinal), sendo exemplificadas para o diâmetro médio de 986,67 μm . Na Figura 4.2a representa-se a partícula de eucalipto no sentido longitudinal, sem cortes, após

moagem. Nas Figura 4.2b, c e d estão apresentadas as imagens das amostras cortadas com uma lâmina fina e afiada no sentido longitudinal, radial e transversal, respectivamente.

Na Figura 4.2a, distingue-se a presença de pontoações areoladas e células parenquimáticas (CP) na estrutura do eucalipto. Na Figura 4.2b, observa-se a presença de elementos de vasos (EV), fibras e pontoações areoladas. Nota-se que nesta Figura a imagem é longitudinal, mostrando as células alongadas que constituem as partículas de eucalipto, enquanto que na Figura 4.2c apresenta-se a direção transversal, que mostra que estas células alongadas formam um grande número de canais na biomassa, responsáveis pelo pouco volume de sólido e conseqüentemente baixa massa específica aparente e elevada massa específica real (Tabela 3.1).

As estruturas identificadas para o eucalipto desempenham diferentes funções: as fibras são responsáveis pela sustentação, rigidez ou flexibilidade da madeira. Os elementos de vaso (EV) pelo transporte de água e solutos à planta, e suporte mecânico. As pontoações são responsáveis pela intercomunicação entre as células, e as células parenquimáticas do raio pelo armazenamento e translocação de água e solutos (SCATENA; SCREMIN-DIAS, 2006; COSTA *et al.*, 2006).

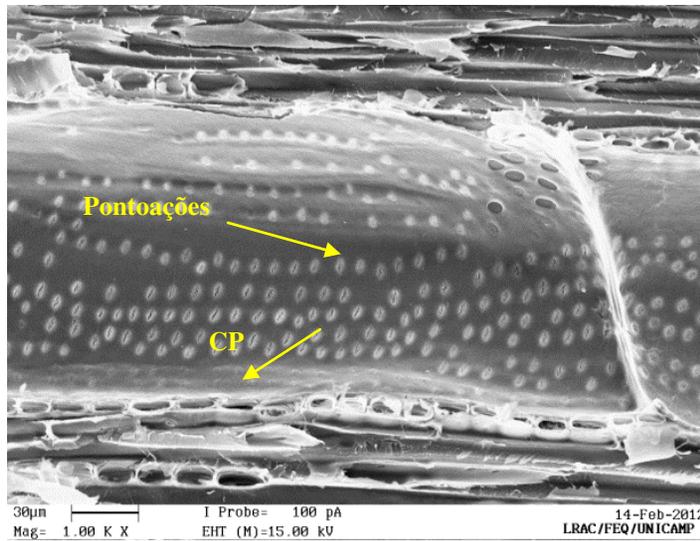
Através das imagens obtidas pelo microscópio de luz (Figura 4.3), visualizaram-se estruturas semelhantes às obtidas pelo MEV, além de se distinguir qualitativamente a presença de lignina, pela coloração avermelhada. Em todas as imagens, realizadas no sentido radial (Figura 4.3a e Figura 4.3c) e transversal (Figura 4.3b e Figura 4.3d), em diferentes aproximações, distinguem-se elementos de vaso (EV), pontoações areoladas na parede, células parenquimáticas do raio (CP) e elevada quantidade de fibras, as quais garantem rigidez ao eucalipto.



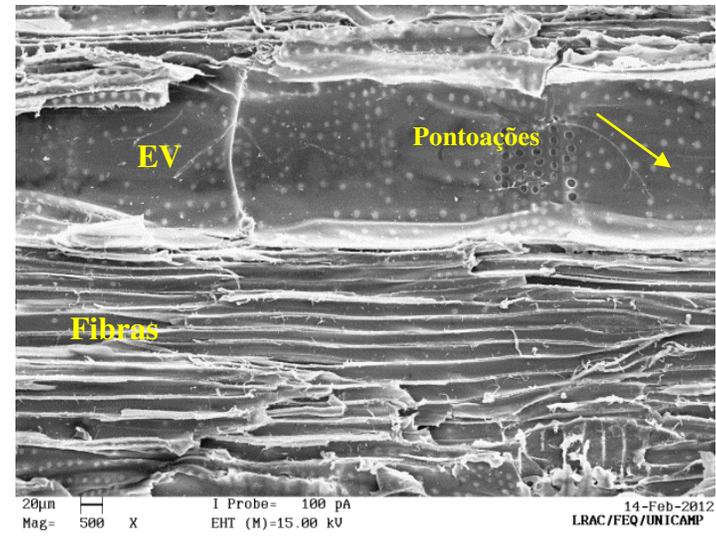
(a) Eucalipto 508,73 μm (150 X)

(b) Eucalipto 986,67 μm (50X)

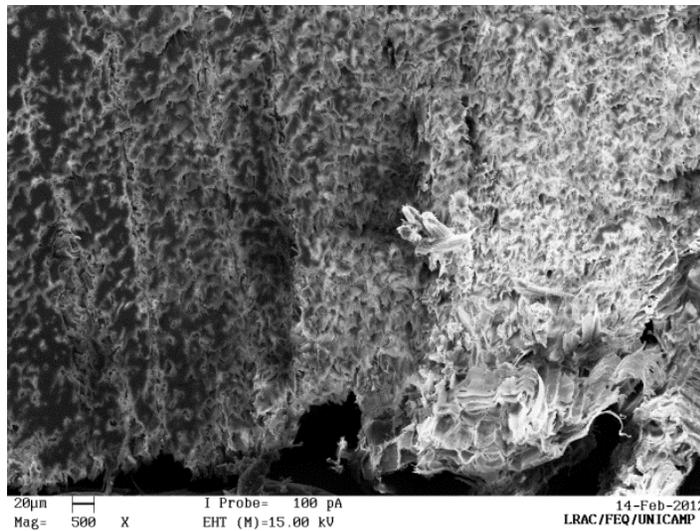
Figura 4.1 MEV de amostras de partículas de eucalipto para os diâmetros médios de (a) 508,73 e (b) 986,67 μm



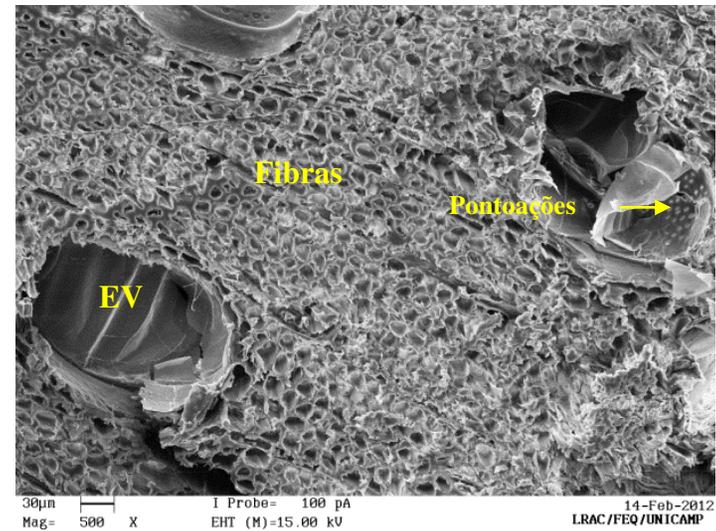
(a) Representação longitudinal da partícula sem cortes (1000X)



(b) Corte longitudinal (500X)



(c) Corte radial (500X)

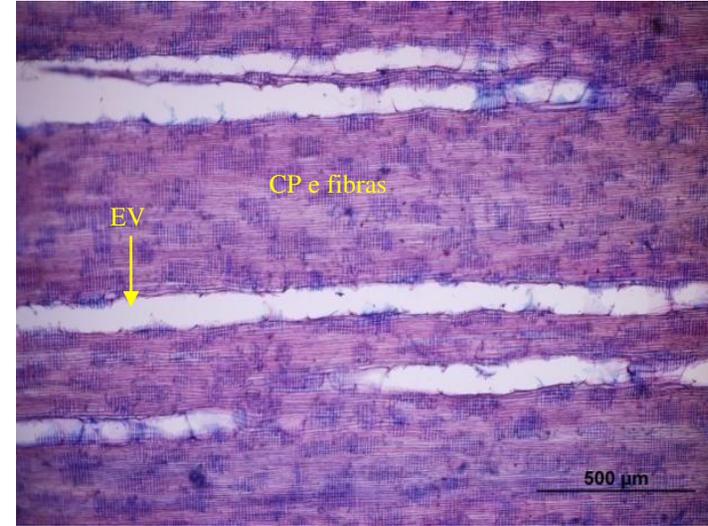


(d) Corte transversal (500X)

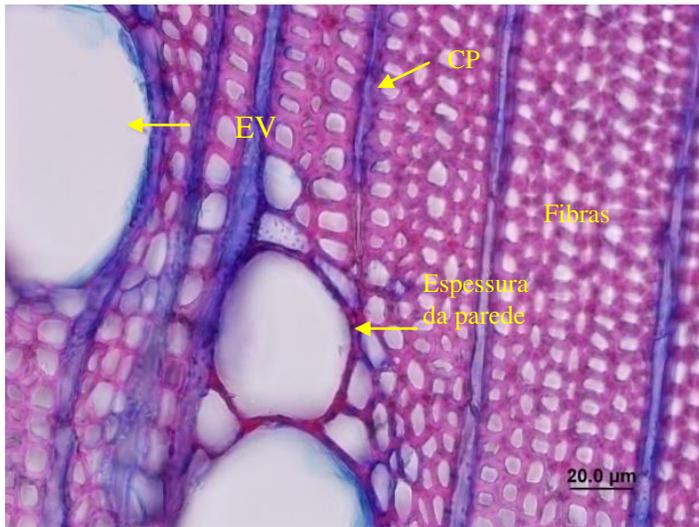
Figura 4.2 MEV da madeira de eucalipto (a) moída e (b, c, d) submetida a cortes em diferentes direções ($\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$)



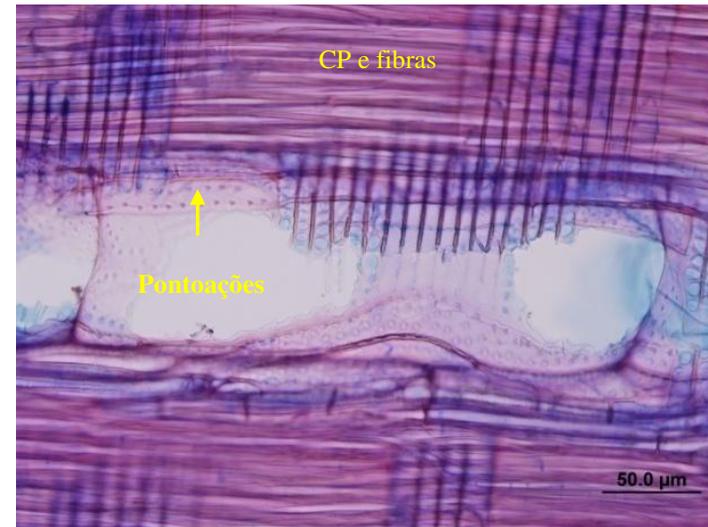
(a) Corte radial



(b) Corte transversal



(c) Corte radial



(d) Corte transversal

Figura 4.3 Microscopia de luz de amostra da madeira de eucalipto

Tucumã

Na Figura 4.4 apresenta-se a imagem de uma partícula do caroço do fruto do tucumã, no diâmetro de 502,48 μm onde se observa sua forma arredondada. Esta característica confirma os elevados valores de esfericidade determinados para este material, entre 0,81 e 0,89, para os diâmetros entre 502,48 μm e 2017,37 μm , respectivamente.

Avaliando sua estrutura com maior ampliação, através do MEV (Figura 4.5a e Figura 4.5b), verifica-se a presença de uma grande quantidade de esclereides, que são células de paredes espessas e muito lignificadas (SCATENA; SCREMIN-DIAS, 2006), além da presença de pontoações, conforme definidas para o eucalipto. A presença de esclereides também é evidenciada pelas análises no microscópio de luz (Figura 4.6a e Figura 4.6b). A forma das esclereides é isodiamétrica, sendo que esta característica confere a forma arredondada das partículas de tucumã (Figura 4.4), comprovada pelos elevados valores de esfericidade (Tabela 4.1).

Para o caroço do fruto do tucumã, também foram analisadas as amostras provenientes da quebra manual com martelo (item 3.5.6.1), conforme apresentado na Figura 4.7. As Figura 4.7a e 4.7b mostram a superfície externa do caroço do tucumã, onde se observa uma superfície irregular e rugosa, não sendo possível a identificação das estruturas presentes. Através das imagens da parede interna (Figura 4.7c e Figura 4.7d), no entanto, percebe-se a presença das células parenquimáticas do raio (CP) e elementos de vaso (EV), no sentido longitudinal e transversal, respectivamente.

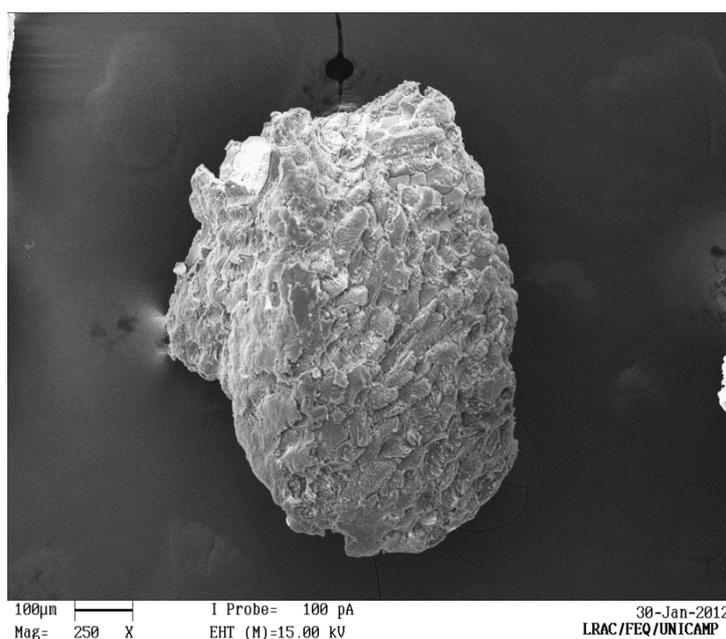
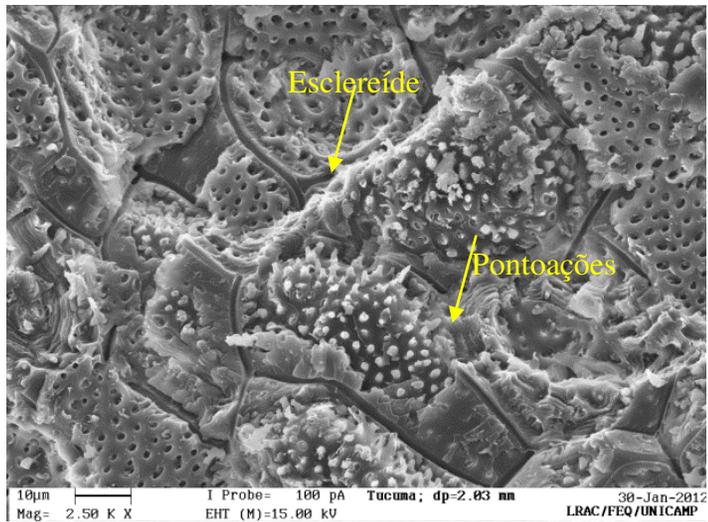
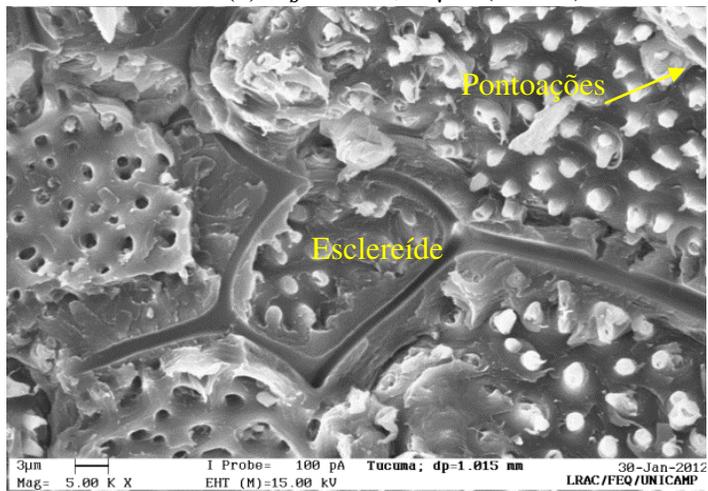


Figura 4.4 MEV de amostras de caroço do fruto do tucumã ($\bar{d}_b = 502,48 \mu\text{m}$, 250 X).

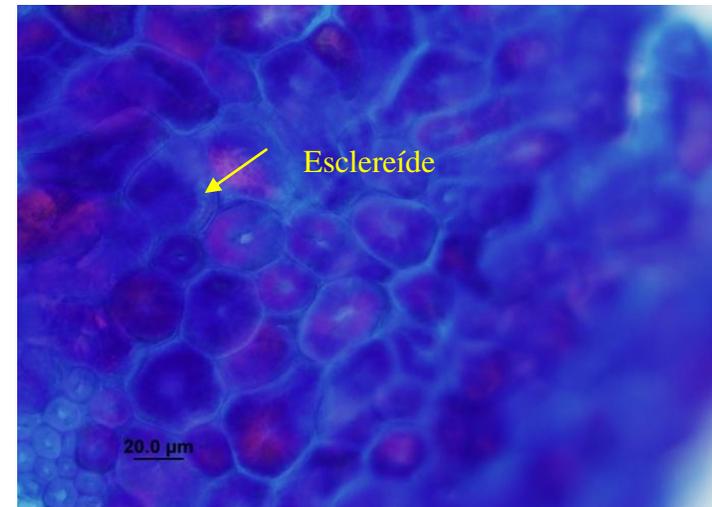


(a) $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$ (2500 x)

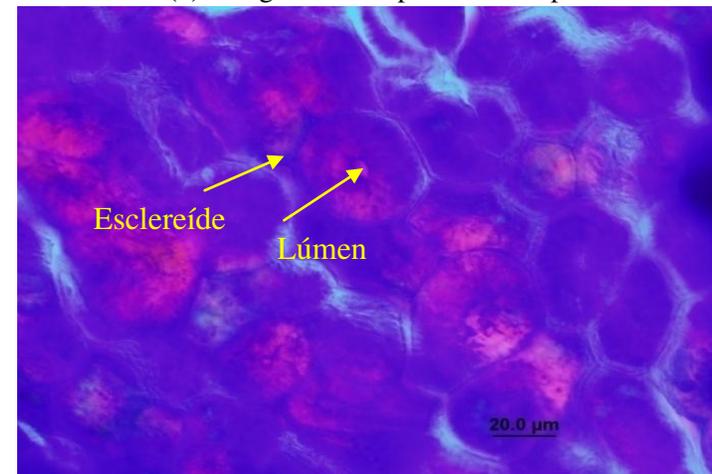


(b) $\bar{d}_b = 1017,53 \mu\text{m}$ (5000 X)

Figura 4.5 MEV do caroço do fruto do tucumã evidenciando esclereídes e pontoações

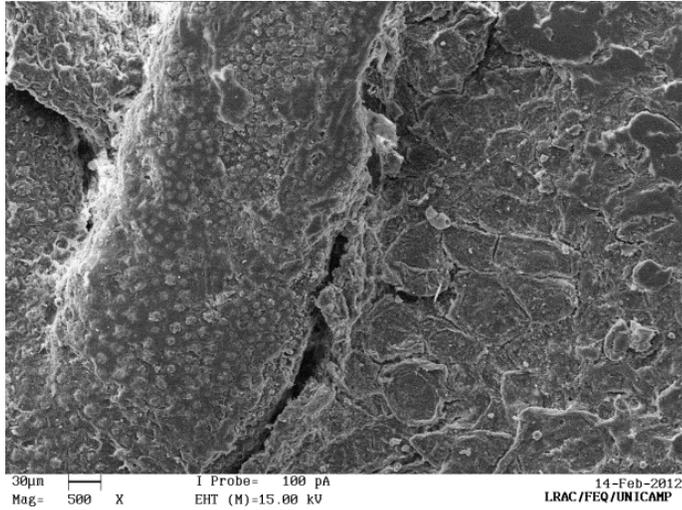


(a) Imagem obtida por microscopia de luz

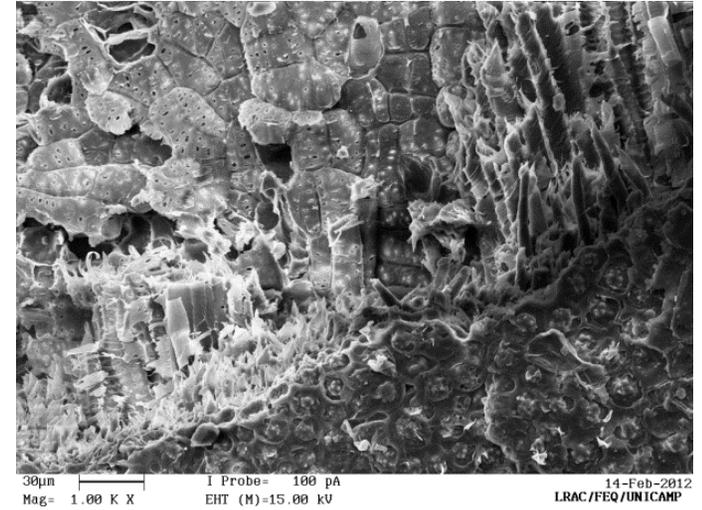


(b) Imagem obtida por microscopia de luz

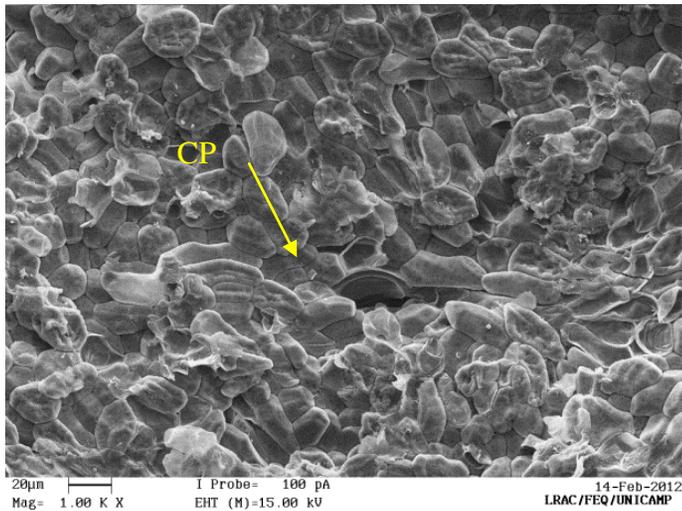
Figura 4.6 Microscopia de luz caroço do fruto do tucumã evidenciando (a) esclereídes e (b) esclerídes e lúmen



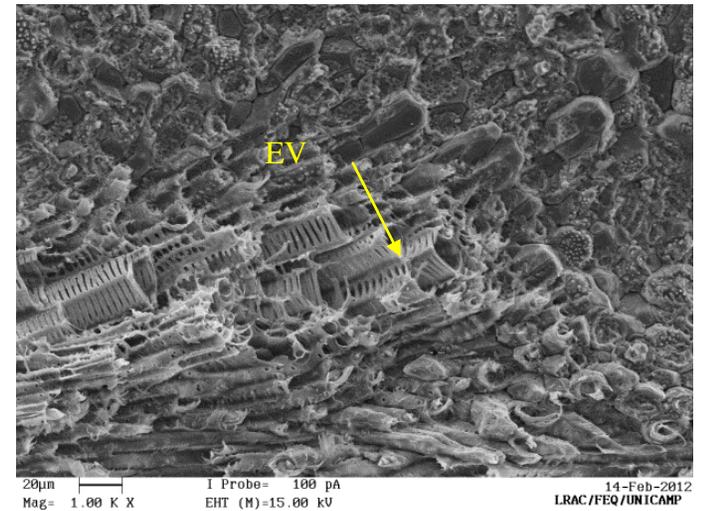
(a) superfície externa (500X)



(b) superfície externa (1000 X)



(c) superfície interna (1000 X)



(d) superfície interna (1000 X)

Figura 4.7 Imagens da superfície externa e interna do caroço do fruto do tucumã – material em pedaços

4.2 Análise dos parâmetros fluidodinâmicos – partículas homogêneas

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores teóricos dos parâmetros fluidodinâmicos referente à velocidade (U_{mf}) e porosidade na mínima fluidização (ε_{mf}) e velocidade terminal (U_t) das partículas utilizadas neste estudo, considerando-as homogêneas como referência.

Tabela 4.2 Propriedades físicas e parâmetros fluidodinâmicos teóricos de partículas homogêneas

Materiais sólidos	\bar{d}_p (μm)	ρ_p (kg/m^3)	ϕ (-)	U_{mf} (m/s)		U_t (m/s)	ε_{mf} (-)
				Lucas (1986)	Ergun (1952)		
Eucalipto	508,73	394,92	0,36 ¹	0,10	0,10	0,48	0,73
	986,67		0,41 ¹	0,27	0,27	0,77	0,69
	1993,71		0,50 ¹	0,54	0,52	1,32	0,62
Caroço do fruto do tucumã	502,47	1115,01	0,81 ²	0,13	0,15	2,25	0,45
	1017,46		0,85 ²	0,36	0,38	3,93	0,43
	2017,37		0,89 ²	0,67	0,68	5,96	0,41
Areia	331,59	2656,71	0,85 ²	0,13	0,14	2,82	0,42

¹Wadell (1935); ²Riley (1941)

As U_{mf} foram determinadas a partir da Equação 4.1 para o caroço do fruto do tucumã e para a areia, e Equação 4.2 para o eucalipto. Estas equações, propostas por Lucas *et al.* (1986), foram elaboradas para partículas não esféricas, e definem os valores do número de Reynolds na mínima fluidização (Re_{mf}), de acordo com a faixa de esfericidade das partículas.

$$Re_{mf} = [29,5^2 + 0,0357Ar]^{1/2} - 29,5 \quad 0,8 < \phi < 1 \quad (4.1)$$

$$Re_{mf} = [25,2^2 + 0,0672Ar]^{1/2} - 25,2 \quad 0,1 < \phi < 0,5 \quad (4.2)$$

A título comparativo determinou-se a U_{mf} pela equação de Ergun (1952) (Equação 2.3), considerando a porosidade na mínima fluidização e esfericidade de um leito fixo em agrupamento frouxo (FOUST *et al.*, 1982).

Os valores teóricos determinados pelas duas equações para U_{mf} apresentaram uma boa concordância com diferenças inferiores a 15 %.

Para o caso da areia, os dados teóricos corroboram com os experimentais, sendo estes para a velocidade e porosidade na mínima fluidização, de 0,10 m/s e 0,41, respectivamente. Ressalta-se que serão tomados como base no decorrer do trabalho os dados experimentais, considerando-os como verdadeiros.

A velocidade terminal de todas as partículas foi calculada pelo software SEREA (RIMOLI *et al.*, 2006; MARANESI; TANNOUS, 2008), através das Equações 4.3 e 4.4, de Haider e Levenspiel (1989):

$$u_t = \left[\frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left[1 + (8,1716e^{-4,0655\varphi_s})Re_p^{0,0964+0,5565\varphi_s} \right] + \frac{73,69(e^{-5,0748})Re_p}{Re_p + 5,378e^{6,2122\varphi_s}} \quad (4.4)$$

4.3 Análise dos parâmetros fluidodinâmicos - partículas heterogêneas

O comportamento do leito formado por partículas heterogêneas, através da mistura de biomassa e inerte, foi avaliado em relação às velocidades e porosidades características para as seguintes influências: natureza das biomassas (eucalipto e o caroço do fruto do tucumã), razão de fração mássica entre biomassa e inerte (χ) de 5 %, 10 %, 15 % e 20 % e razão de diâmetro médio (D) de 1,5, 3,0 e 6,0. Os resultados estão apresentados nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã, respectivamente. Ressalta-se que devido à concordância dos valores de velocidades obtidos pelos métodos de queda de pressão e desvio padrão das flutuações de pressão (desvio padrão máx. 0,05), estas estão apresentadas como a média entre os métodos.

Tabela 4.3 Resultados experimentais e teóricos dos parâmetros fluidodinâmicos para partícula homogênea e mistura eucalipto/areia

Sólido	\bar{d}_p (μm)	D (-)	χ (%)	U_{fi} (m/s)	U_{fa} (m/s)	U_s (m/s)	U_{fc} (m/s)	U_{fc}/U_{fi} (-)	U_{fc}/U_{fa} (-)	U_{fc}/U_s (-)	$U_{fc}-U_{fa}$ (m/s)	U_{mf} (m/s)	U_t (m/s)	ε_{mf} (-)	ε_{fa} (-)	ε_{fc} (-)
Areia	331,58	-										0,10	2,82	0,41	-	-
			5	0,10	0,11	0,23	0,30	3,05	2,77	1,36	0,20				0,45	0,63
	508,73	1,5	10	0,11	0,13	0,29	0,42	3,82	3,36	1,45	0,30	0,09	0,48	0,45	0,47	0,71
			15	0,11	0,13	0,30	0,47	4,27	3,62	1,57	0,34				0,48	0,71
			20	0,13	0,14	0,34	0,56	4,31	4,15	1,65	0,43				0,55	0,82
			5	0,13	0,15	0,24	0,40	3,08	2,76	1,67	0,26				0,42	0,68
Eucalipto	986,67	3,0	10	0,12	0,14	0,30	0,50	4,17	3,70	1,67	0,37	0,26	0,77	0,43	0,41	0,71
			15	0,13	0,15	0,41	0,68	5,23	4,69	1,66	0,54				0,42	0,79
			20	-	0,41	0,56	0,98	2,88	2,39	1,75	0,57				0,58	0,83
			5	0,11	0,12	0,27	0,43	3,91	3,74	1,62	0,32				0,41	0,71
	1993,71	6,0	10	0,11	0,14	0,31	0,50	4,08	3,64	1,67	0,37	0,52	1,32	0,41	0,40	0,72
			15	-	0,24	0,40	0,80		3,33	2,00	0,56				0,39	0,77
			20	-	0,36	0,54	1,12		3,11	2,09	0,76				0,46	0,80

Tabela 4.4 Resultados experimentais e teóricos dos parâmetros fluidodinâmicos para partícula homogênea e mistura tucumã/areia

Sólido	\bar{d}_p (μm)	D (-)	χ (%)	U_{fi} (m/s)	U_{fa} (m/s)	U_s (m/s)	U_{fc} (m/s)	U_{fc}/U_{fi} (-)	U_{fc}/U_{fa} (-)	U_{fc}/U_s (-)	$U_{fc}-U_{fa}$ (m/s)	U_{mf} (m/s)	U_t (m/s)	ε_{mf} (-)	ε_{fa} (-)	ε_{fc} (-)
Areia	331,58	-						--				0,10	2,82	0,41	-	-
			5	0,08	0,08	0,12	0,22	2,75	2,75	1,69	0,14				0,39	0,64
	502,47	1,5	10	0,07	0,07	0,14	0,23	3,29	3,29	1,70	0,16	0,12	2,25		0,40	0,64
			15	0,07	0,07	0,13	0,23	3,29	3,29	1,77	0,16			0,40	0,64	
			20	0,08	0,08	0,13	0,27	3,38	3,38	2,08	0,19			0,43	0,65	
			5	0,11	0,11	0,20	0,27	2,45	2,45	1,35	0,16				0,40	0,61
	1017,46	3,1	10	0,10	0,10	0,21	0,27	2,80	2,80	1,37	0,18	0,36	3,93		0,40	0,61
			15	0,10	0,10	0,20	0,29	2,90	2,90	1,45	0,19			0,40	0,63	
			20	0,11	0,11	0,20	0,32	2,95	2,95	1,67	0,22			0,37	0,67	
			5	0,10	0,10	0,18	0,28	2,80	2,80	1,56	0,18				0,37	0,65
	2017,37	6,1	10	0,11	0,11	0,19	0,32	2,91	2,91	1,68	0,21	0,61	5,96		0,38	0,66
			15	0,11	0,11	0,20	0,35	3,18	3,18	1,75	0,24			0,38	0,67	
			20	0,11	0,13	0,21	0,42	3,82	3,23	2,00	0,29			0,38	0,72	

Observa-se na Tabela 4.3 que para os casos de $D = 3,0$ e $\chi = 20\%$ e $D = 6,0$ para $\chi = 15\%$ e 20% , não foi possível a determinação de U_{fi} . Através do método da queda de pressão definiu-se um valor de U_{fi} correspondente ao último ponto de crescimento linear da queda de pressão com a velocidade superficial do gás. No entanto, avaliando as imagens registradas para o experimento, o ponto possível de U_{fi} , não corresponde ao início da fluidização no leito. O desvio padrão comprovou esta verificação, onde foi observado que não há flutuações abaixo de U_{fa} .

Para o eucalipto, χ de 20% e diâmetros de biomassa de $508,73\ \mu\text{m}$ ($D = 1,5$) e $986,67\ \mu\text{m}$ ($D = 3$), a velocidade máxima utilizada foi superior à velocidade terminal das biomassas puras. Pequenos arrastes foram observados e mensurados ao final de cada experimento, sendo este em torno de 3% da massa total.

4.3.1 Influência da natureza da biomassa

Devido à diversidade das amostras de biomassa, duas propriedades físicas puderam auxiliar na interpretação do comportamento fluidodinâmico dos leitos, sendo estas a massa específica e a geometria das amostras.

A proximidade das massas específicas aparentes entre o caroço de tucumã ($1115,01\ \text{kg/m}^3$) e o inerte ($2636\ \text{kg/m}^3$) indica uma tendência de mistura com características homogêneas, sendo esta mais significativa do que para o caso de mistura de eucalipto ($394,92\ \text{kg/m}^3$) e inerte. Isto porque diminui a possibilidade de formação de uma zona de segregação no leito, verificado pela diferença entre $U_{fc} - U_{fa}$ (Tabela 4.3 e Tabela 4.4), as quais delimitam os estados de segregação e mistura no leito, aumentando em 2,6 vezes (0,21 a 0,76 m/s) para a mistura eucalipto/inerte e em 1,07 vezes (0,14 a 0,29m/s) para a mistura tucumã/inerte, considerando toda a faixa de razão de diâmetro (D) e fração mássica (χ) estudada.

Com relação à geometria das amostras, observa-se que a forma do caroço do fruto do tucumã também contribuiu para a mistura com o inerte, já que os dois sólidos apresentaram formato irregular e esfericidades bastante próximas, de 0,85 para o inerte e $0,81 < \phi < 0,89$ para o tucumã.

A baixa esfericidade do eucalipto, $0,36 < \phi < 0,50$, definido como paralelepípedo retangular, pode ter promovido sua separação do inerte, devido à redução da área de contato entre as partículas, dificultando a mistura principalmente para baixas velocidades. Conforme discutido no item 2.5.3.3, o trabalho de Aznar *et al.* (1992a,b), foi o único que utilizou a forma da partícula

para avaliar o comportamento fluidodinâmico de uma biomassa na mistura, ao observar que a palha, partícula alongada e estreita, move-se com grande dificuldade causando a formação de canais no leito e não permitindo sua fluidização. A partir de um volume de 30 % de biomassa e velocidade intermediária entre $U_{fa} < U < U_{fc}$ ($\sim 0,35$ m/s), a palha segregou para a base do leito, não permitindo mais a mistura.

Pelas observações visuais, também foi possível observar que a mistura eucalipto/inerte apresentou pior qualidade (Figura 4.8), do que a mistura tucumã inerte (Figura 4.9). Como pode ser visto nas Figura 4.8a, b e c, o leito contendo o eucalipto apresenta elevada segregação, com a biomassa depositada na superfície, enquanto o inerte permanece na base do leito. Para a maior razão de diâmetro e fração de biomassa na mistura ($D = 6$ e $\chi = 20$ %), observou-se ainda o fenômeno de colapso do leito na velocidade de fluidização aparente (Figura 4.8a). Todas as misturas tucumã/inerte, no entanto, apresentaram elevada homogeneidade, com poucas partículas de tucumã suspensas sobre a superfície do leito de inerte.



(a) $U_{fa} = 0,36$ m/s –



(b) $U_s = 0,54$ m/s



(c) $U_{fc} = 1,12$ m/s

Figura 4.8 Imagens do comportamento fluidodinâmicos das misturas e suas velocidades características (a) Aparente (b) Segregação e (c) Completa

(mistura eucalipto/areia, $\bar{d}_b = 1993,71 \mu\text{m}$, $\chi = 20$ %)



(a) $U_{fa} = 0,13$ m/s

(b) $U_s = 0,21$

(c) $U_{fc} = 0,42$ m/s

Figura 4.9 Imagens do comportamento fluidodinâmicos das misturas e suas velocidades características (a) Aparente (b) Segregação e (c) Completa

(mistura tucumã/areia, $\bar{d}_b = 2017,37$ μm , $\chi = 20\%$)

4.3.2 Influência da razão da fração mássica entre biomassa e inerte

Os resultados dos parâmetros fluidodinâmicos analisados em relação à influência da razão de fração mássica ($5\% < \chi < 20\%$) nas misturas estão apresentados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

Na Figura 4.10 e Figura 4.11 exemplificam-se a evolução das velocidades e porosidades características, respectivamente, em função da razão da fração mássica das misturas eucalipto/inerte, para $D = 6,0$. Nesta mistura, a U_{fi} é caracterizada basicamente como a velocidade mínima de fluidização da areia (0,10 m/s) sendo esta a partícula de menor diâmetro e maior massa específica. As velocidades de fluidização aparente (U_{fa}), de segregação (U_s) e de fluidização completa (U_{fc}) são crescentes com o aumento da razão de fração mássica entre biomassa/inerte, sendo mais significativa à medida que aumenta a razão de diâmetro médio (Tabela 4.3).

No trabalho de Aznar *et al.* (1992a,b), os autores observaram que para a mistura serragem/areia, as velocidades de fluidização aparente e completa aumentaram linearmente para frações de até 50 % (em volume), e após esta fração aumentam acentuadamente. No entanto, acima de 75-80 %, a mistura não foi mais fluidizável. Apesar de os autores utilizarem fração volumétrica, esta é comparativa a fração mássica que utilizamos no presente trabalho, já que

ambas indicam o crescimento da porção de biomassa no leito em relação à quantidade de inerte utilizada.

No presente trabalho, para a mistura eucalipto/inerte, observou-se que a região de segregação ($U_{fc} - U_{fa}$) aumentou com a razão de fração de 2,2 a 2,4 vezes para todos os diâmetros, conforme mostrado na Tabela 4.3. Este crescimento também é evidenciado pela razão U_{fc}/U_s , na faixa de 1,4 - 2,1. Para as outras razões (U_{fc}/U_{fi} e U_{fc}/U_{fa}), este crescimento também é observado, com exceção para $D = 3$, $\chi = 20\%$, e $D = 6$, $\chi = 15\%$ e 20% , onde estas razões são decrescentes, devido à má qualidade da mistura. Ressalta-se que para $D = 6$, $\chi = 20\%$ e velocidades ligeiramente acima de U_{fa} , houve dificuldade de manter a mistura, havendo o colapso do leito, levando a mistura ao estado de leito fixo.

Mitri *et al.* (2011) também evidenciaram uma região de segregação no leito formada pela mistura da madeira jequitibá rosa com inerte, sendo esta de menor intensidade em relação ao eucalipto, devido a maior proximidade das massas específicas aparentes da biomassa (770 kg/m^3), em relação ao inerte (2636 kg/m^3). Para os autores, no entanto, a fração de $12,5\%$ requer altas velocidades para que haja mistura efetiva ($U_{fc} = 0,81 \text{ m/s}$), e esta ocorre com baixa qualidade, devido à tendência de segregação da biomassa para a base do leito, sendo este o limite de fração mássica de biomassa na mistura.

Avaliando a evolução das porosidades para a mistura eucalipto/inerte (Figura 4.11), pode-se observar que as porosidades de fluidização aparente (ϵ_{fa}) e completa (ϵ_{fc}) são mais influenciadas para a fração de 20% , devido à presença gradativa de bolsões de gás (pistões) presentes no leito. Comparativamente, Ramarkers *et al.* (2004), que analisou misturas da madeira *Fagus sylvatica* em mistura com a areia, verificou que para as faixas de diâmetro de $100 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$ e $400 \mu\text{m} - 600 \mu\text{m}$, a porosidade é crescente com o aumento da fração de biomassa apenas a partir de 20% . Ressalta-se novamente que os autores trabalharam com partículas em formato cilíndrico, e com maior massa específica (722 kg/m^3), do que a utilizada neste trabalho.

Para a mistura tucumã/inerte, os valores de U_{fi} e U_{fa} são iguais (Tabela 4.4), sendo este um indicativo da homogeneidade da mistura. Assim como para a mistura eucalipto/inerte, os valores de U_{fi} encontrados são próximos a velocidade mínima de fluidização do inerte. As velocidades de fluidização inicial, aparente e completa aumentam lentamente com a fração mássica de biomassa nas misturas, tendo uma variação mais significativa na fração de 20% (Figura 4.12). Foi verificada a presença de U_s nas misturas, indicando maior concentração de

tucumã no topo do leito a partir desta velocidade. A região de segregação ($U_{fc} - U_{fa}$) sofreu pouca influência com o aumento da fração de biomassa nas misturas, aumentando de 1,4 a 1,6 vezes.

Na Figura 4.13, a ε_{fa} é praticamente constante e comparável a do inerte com relação à razão de fração mássica e diâmetro médio. A ε_{fc} é crescente com relação à razão de fração em maior e menor intensidade e dependente do diâmetro da partícula.

O aumento da velocidade de fluidização aparente com a fração mássica de biomassa nas misturas, evidenciado para o eucalipto e para o tucumã, também foi observada no trabalho de Ramarkers *et al.* (2004), apesar dos autores terem usado chips de madeira, de formato cilíndrico ($L = 9\text{mm}$, $D = 6\text{ mm}$). Da mesma forma, como encontrado nos trabalhos de Tannous *et al.* (2008), Tannous e Mizonov (2009) e Rao e Bhemarasetti (2001), verificou-se um aumento das velocidades características, em menor ou maior intensidade, com a fração de biomassa nas misturas, bem como da porosidade na velocidade de fluidização aparente.

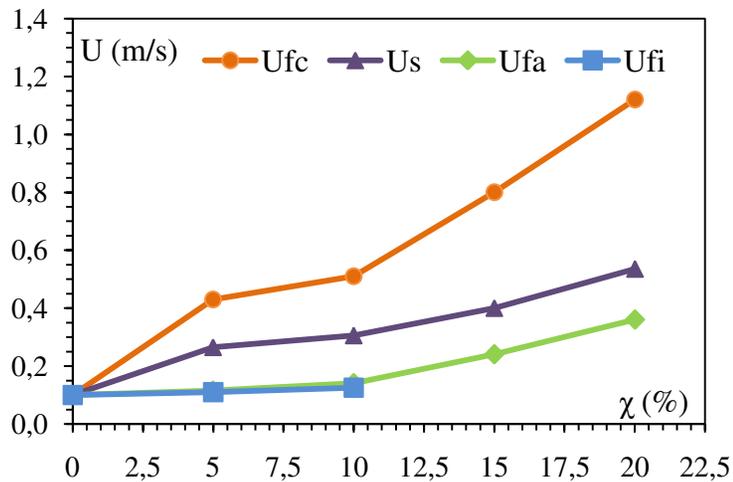


Figura 4.10 Evolução das velocidades características em função da razão da fração mássica

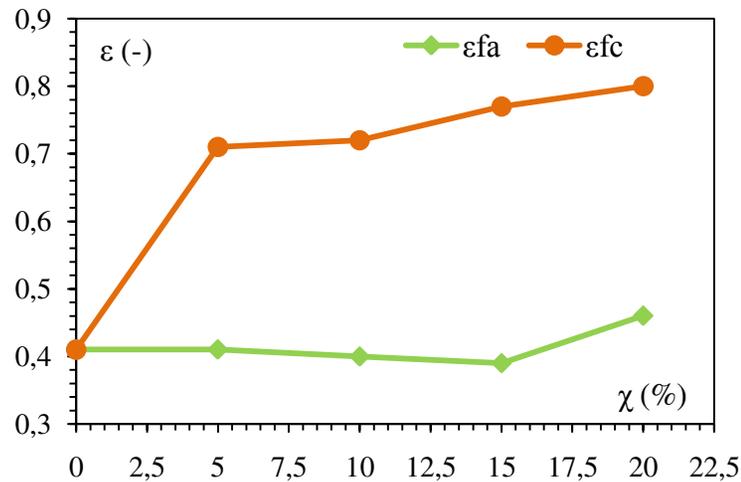


Figura 4.11 Evolução da porosidade aparente e completa em função da razão da fração mássica

Mistura eucalypto/areia, $\bar{d}_b = 1993,71 \mu\text{m}$

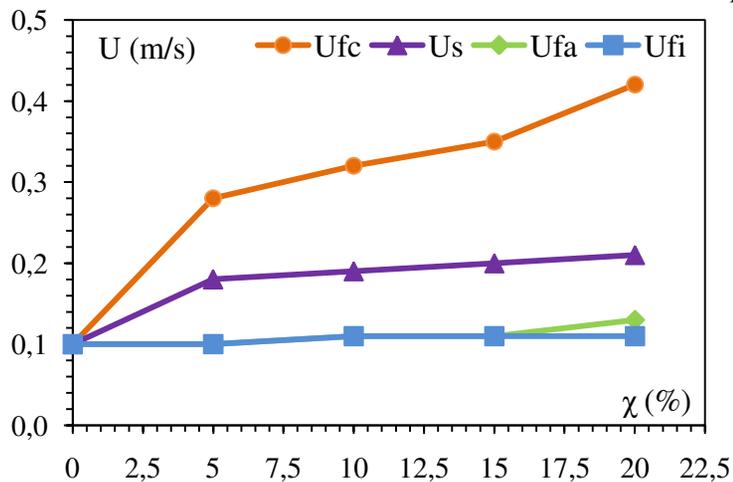


Figura 4.12 Evolução das velocidades características em função da razão da fração mássica

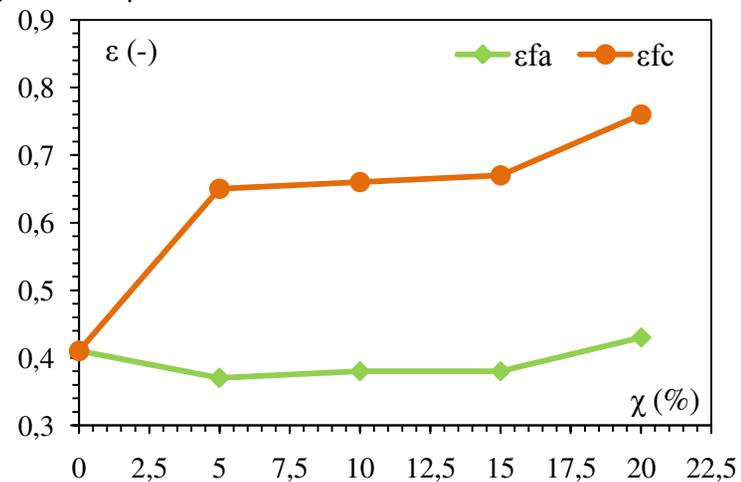


Figura 4.13 Evolução da porosidade aparente e completa em função da razão da fração mássica

Mistura tucumã/areia, $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$

4.3.2.1 Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás

Na Figura 4.14 e Figura 4.16 estão representadas as evoluções da queda de pressão total, em função da velocidade superficial do gás, para as misturas eucalipto/inerte, e na Figura 4.18 e Figura 4.20 para as misturas tucumã/inerte, nas razões de diâmetro igual a 6,0 e frações mássicas de 5 % e 20 %.

A fluidização das misturas de biomassa e inerte, à vazão decrescente, provocou o processo de separação das partículas, onde a parte superior do leito é rica em partículas de maior diâmetro e menor massa específica, enquanto que as partículas pequenas e de maior massa específica são majoritárias na base do leito.

Para velocidades superficiais do gás superiores há um valor crítico, considerado U_{fc} , a queda de pressão total através do leito tende a um valor constante, entre 890 Pa e 1270 Pa, correspondentes às razões de fração mássica de 5 % e 20 %, respectivamente. Estes valores correspondem entre 72 % e 90 % do peso aparente do leito por unidade da seção transversal da coluna, nas frações correspondentes.

Logo abaixo de U_{fc} , encontra-se a velocidade de segregação (U_s), definida como o início do decaimento da queda de pressão. Neste ponto as partículas estão separadas e a biomassa é sustentada pelo inerte, o qual está em borbulhamento na base do leito.

Diminuindo ainda a velocidade superficial do gás, define-se U_{fa} como a velocidade característica do estado fluidizado comparativo a velocidade mínima de fluidização para partículas homogêneas. Para a mistura eucalipto/inerte, observa-se na Figura 4.8a, que nesta velocidade apenas uma pequena quantidade de areia está fluidizada devido a caminhos preferenciais, enquanto o eucalipto mantém-se segregado ao interior do leito.

Em comparação, nesta velocidade, o leito formado pela mistura tucumã/inerte apresenta elevado borbulhamento, com a biomassa misturada uniformemente no leito, com apenas uma leve camada suspensa sobre a superfície (Figura 4.9a).

Observa-se nas Figura 4.14 a Figura 4.20, que as velocidades de fluidização inicial (U_{fi}) estão próximas à velocidade mínima de fluidização do inerte (0,10 m/s) sendo estas na ordem de grandeza 0,07 a 0,13 m/s (Tabela 4.3 e Tabela 4.4),

Abaixo desta velocidade encontra-se um decréscimo linear da queda de pressão considerado como leito fixo com predominância das forças viscosas ($1,84 < Re_p < 16,68$).

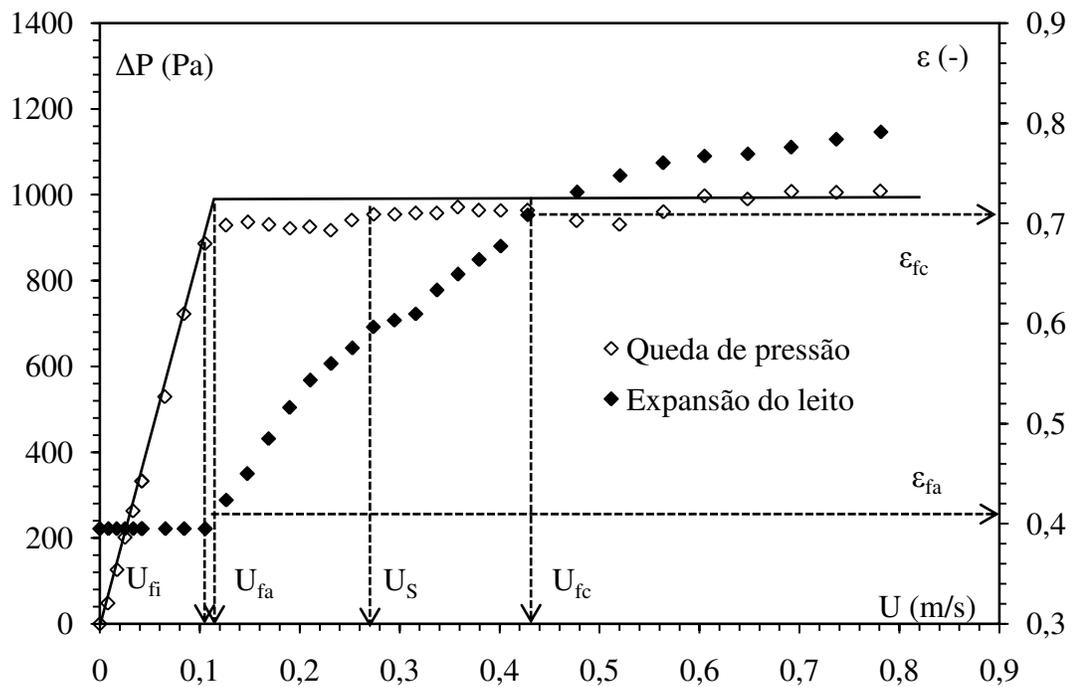


Figura 4.14 Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás

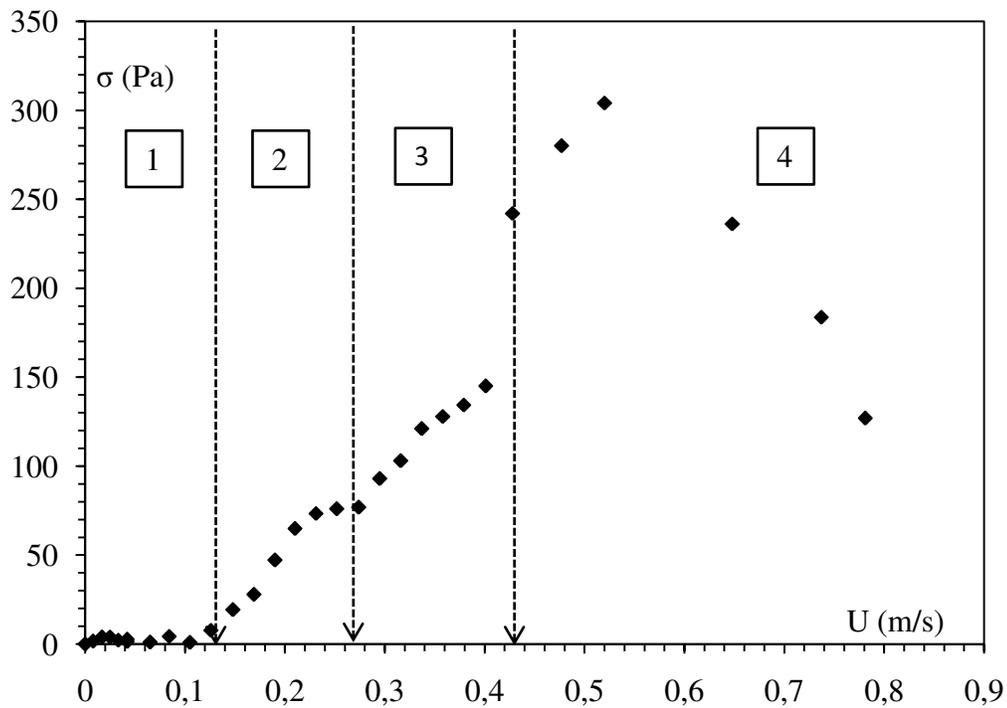


Figura 4.15 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás

(mistura eucalipto/areia, $\bar{d}_b = 1993,71\mu\text{m}$, $D = 6$, $\chi = 5\%$)

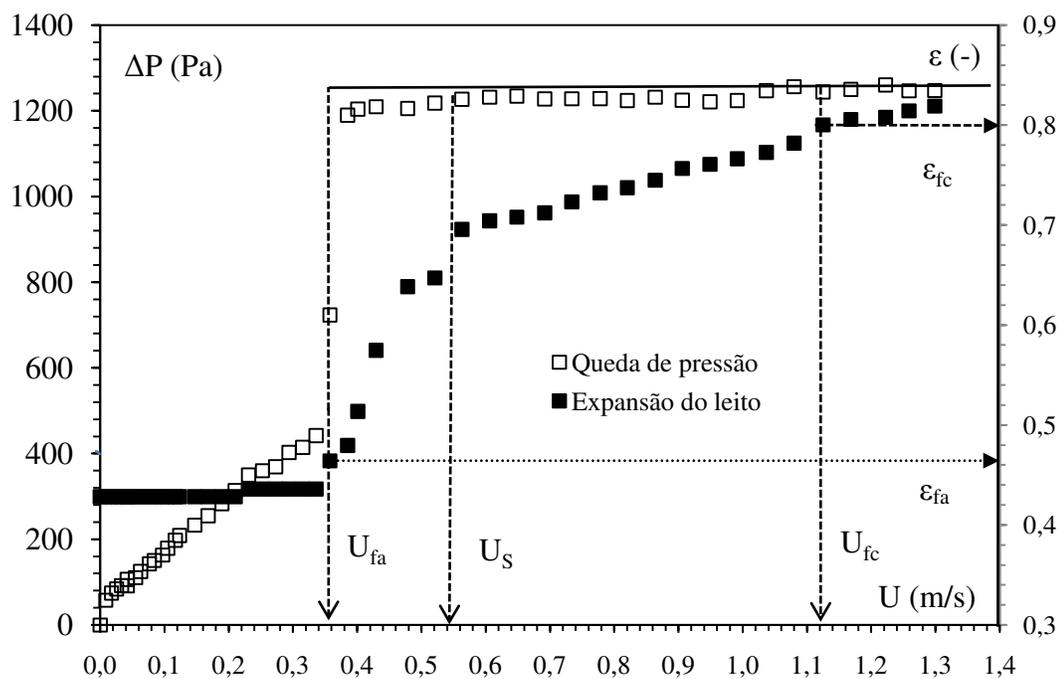


Figura 4.16 Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás

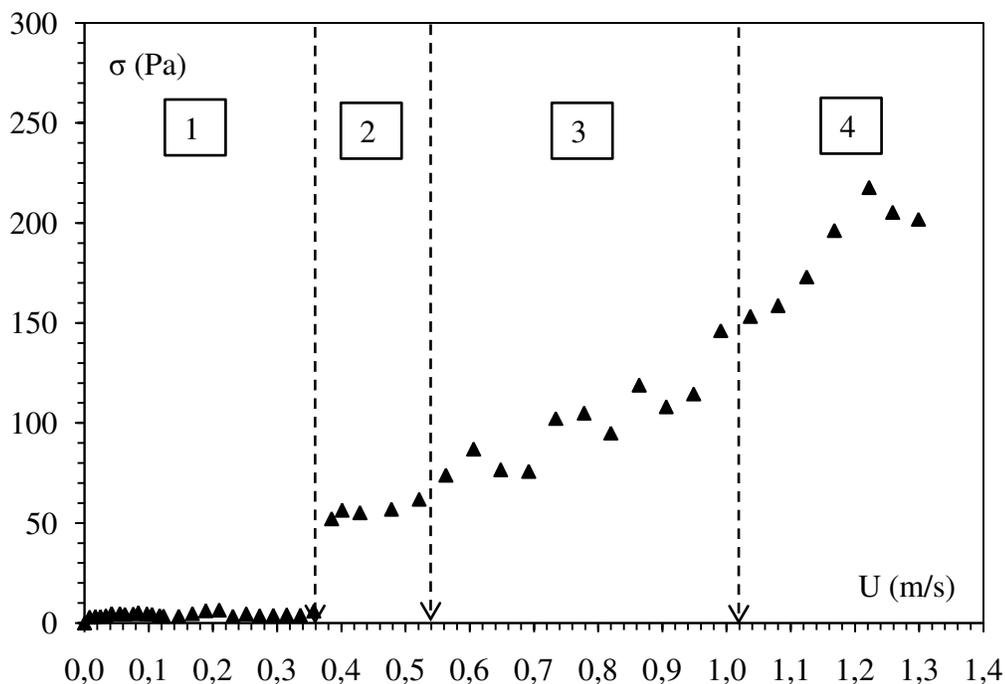


Figura 4.17 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás

(mistura eucalipto/areia, $\bar{d}_b = 1993,71\mu\text{m}$, $D = 6$, $\chi = 20\%$)

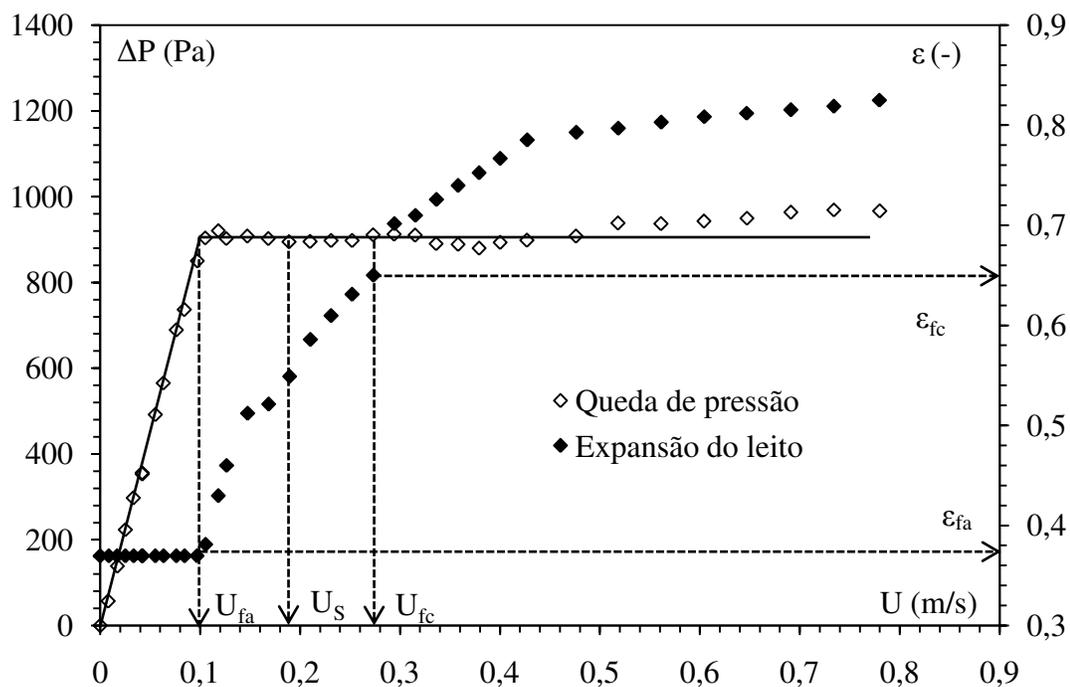


Figura 4.18 Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás

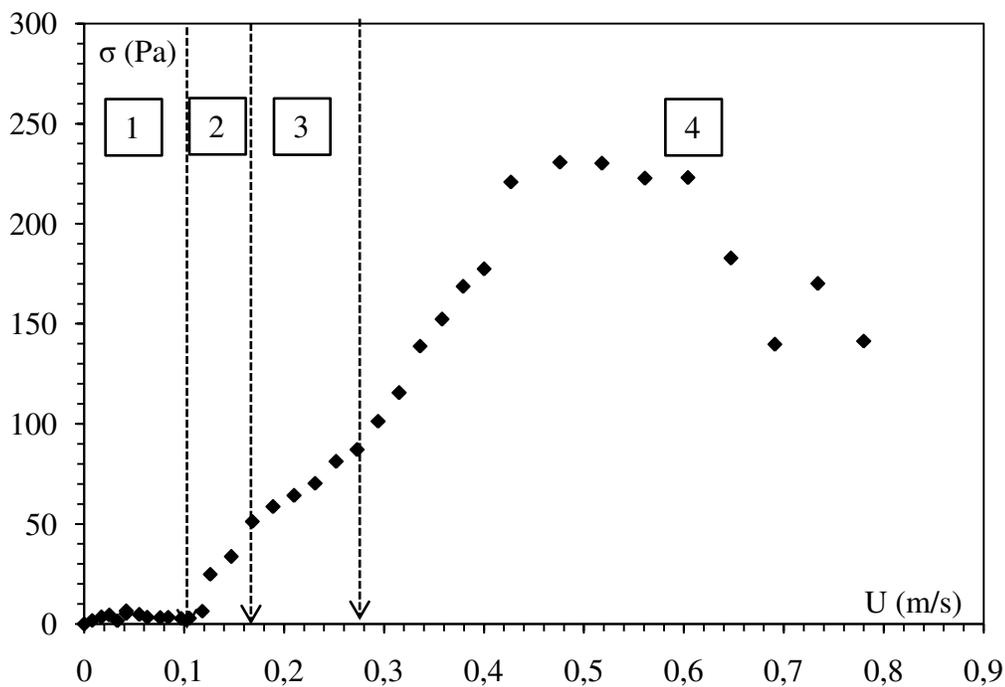


Figura 4.19 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás

(mistura tucumã/areia, $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$, $D = 6,1$, $\chi = 5 \%$)

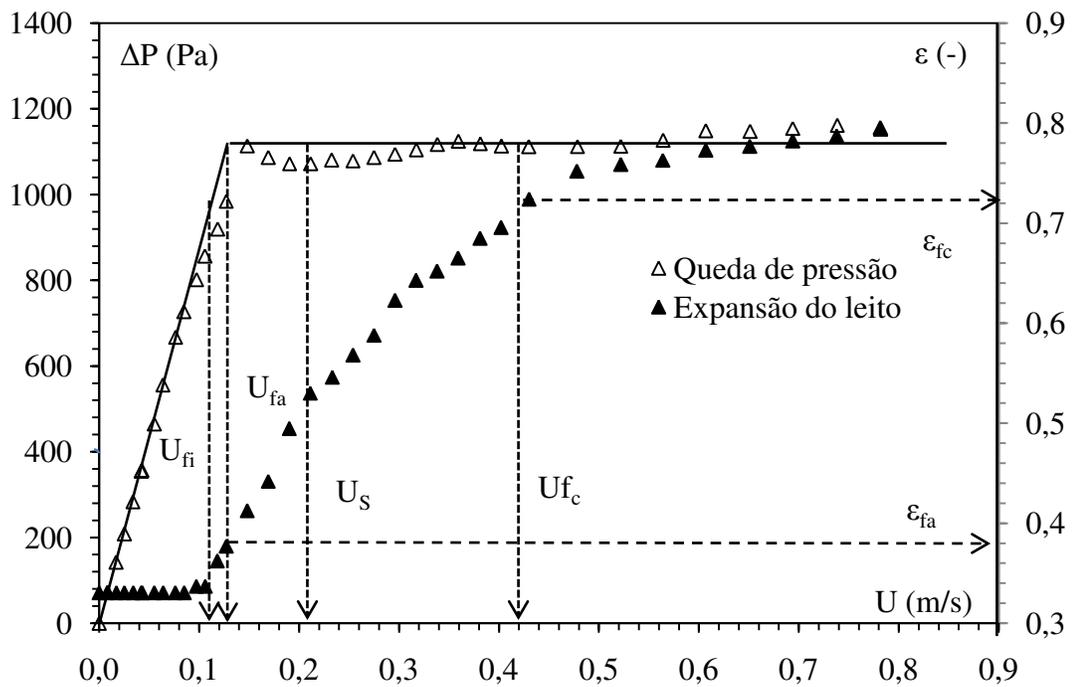


Figura 4.20 Evolução da queda de pressão total em função da velocidade superficial do gás

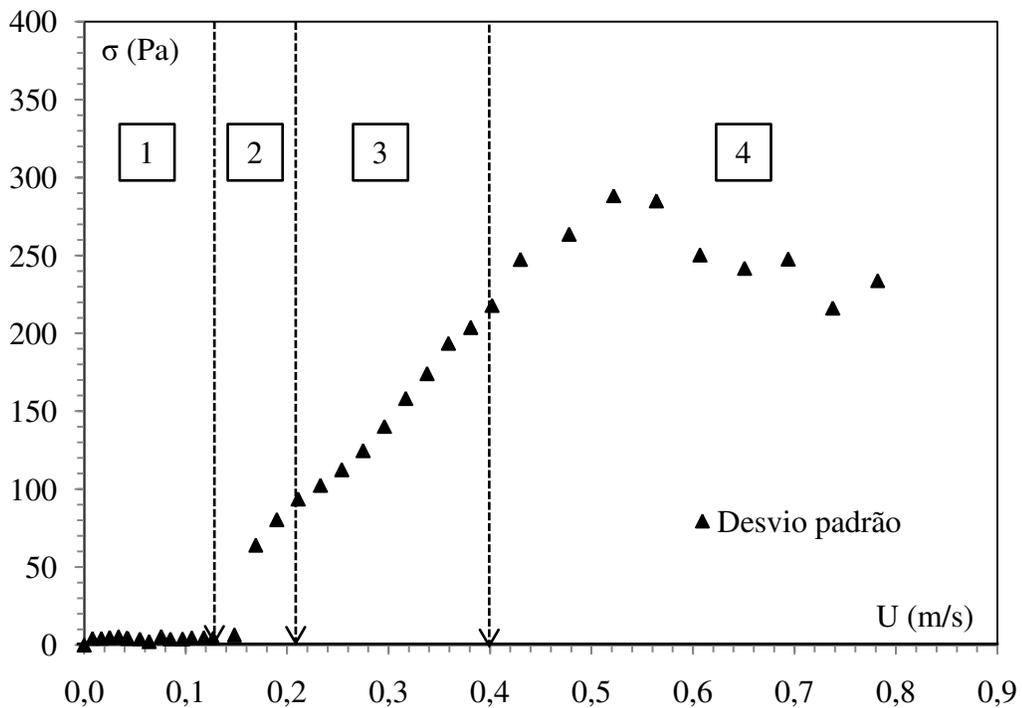


Figura 4.21 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás

(mistura tucumã/areia, $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$, $D = 6,1$, $\chi = 20 \%$)

A Figura 4.22 e Figura 4.23 exprimem a influência da razão de fração mássica (5 % a 20 %) sobre a queda de pressão em função da velocidade superficial do gás para as biomassas, eucalipto e caroço do fruto do tucumã, respectivamente. Pode-se observar o comportamento dos leitos desde um leito homogêneo composto somente por inerte (0 % biomassa) até os leitos de misturas entre as respectivas razões de fração.

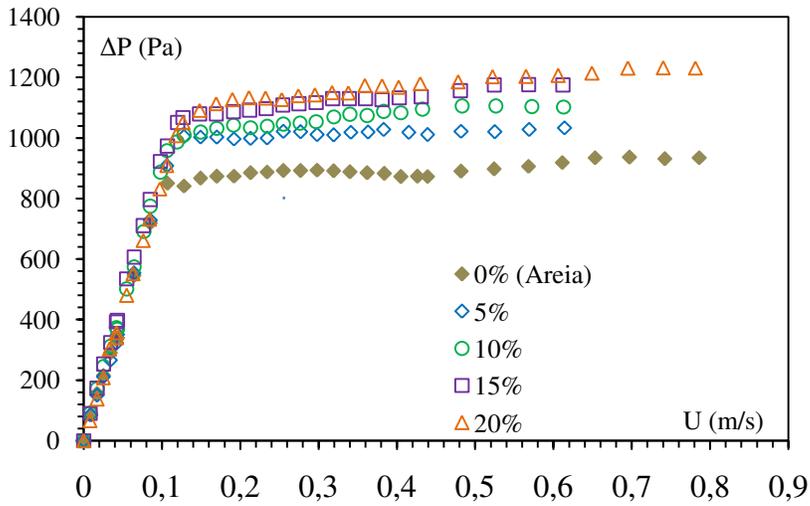
O perfil da queda de pressão segue uma tendência de comportamento homogêneo em todas as frações do menor diâmetro de eucalipto (508,73 μm) (Figura 4.22a) até 15 % para o diâmetro intermediário (986,67 μm) (Figura 4.22b) e até 10 % para o maior diâmetro (1993,71 μm) (Figura 4.22c). Acima destas condições, os perfis de queda de pressão possuem características de misturas de partículas com propriedades físicas bastante diferenciadas, como em Rao e Bhemarasetti (2001); Tannous e Mizonov (2009) e Mitri *et al.* (2011).

4.3.2.2 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão total em função da velocidade superficial do gás

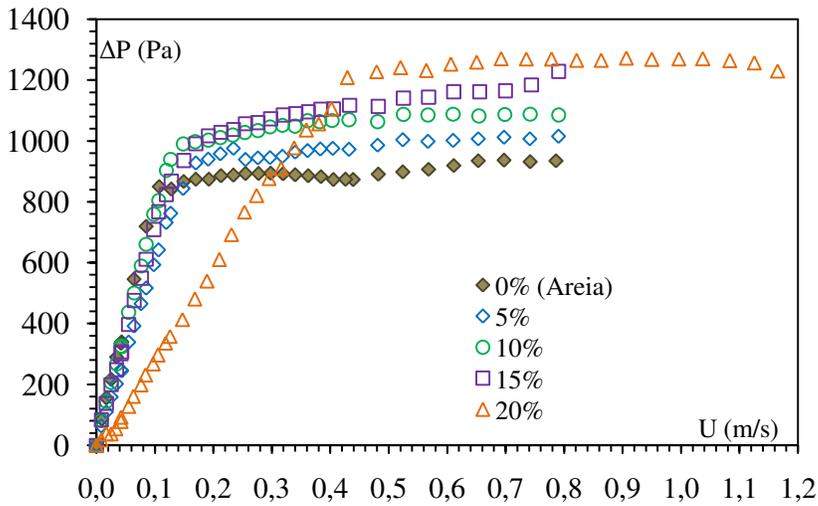
A partir do desvio padrão das flutuações de pressão total em função da velocidade superficial do gás, à vazão decrescente, informações complementares foram obtidas sobre as velocidades características e comportamento do leito, através das Figura 4.15 e Figura 4.17 para as misturas eucalipto/areia, e através das Figura 4.19 e Figura 4.21 para a mistura tucumã/areia.

A Figura 4.15, relativa à fração de 5 %, representa a mistura eucalipto/inerte com características homogêneas. Consta-se que o desvio das flutuações de pressão diminui lentamente de 300 Pa (máx) a 240 Pa, quando a velocidade diminui até a U_{fc} (região 4 – leito efetivamente fluidizado). Depois diminuem bruscamente de 240 Pa a 80 Pa entre U_{fc} e U_s (região 3 - segregado parcial). A intensidade das bolhas e pistões na parte inferior do leito diminui, mas é suficiente para assegurar uma flotação parcial das partículas grandes.

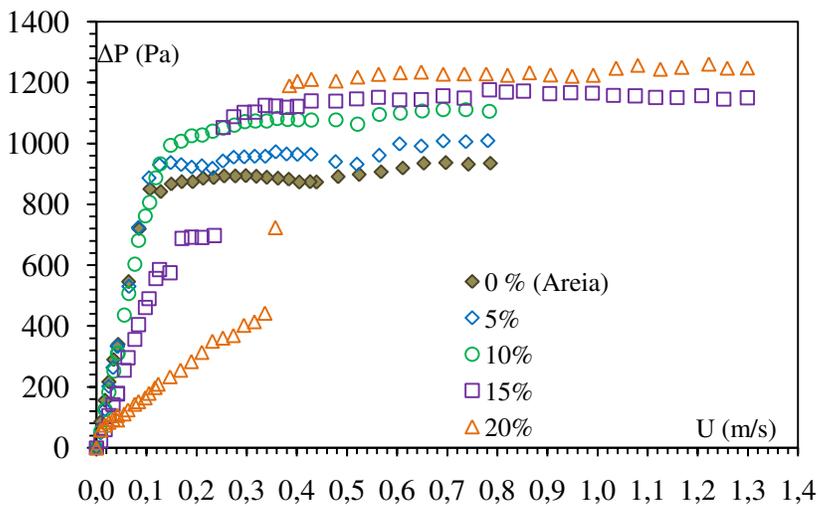
Para velocidades inferiores a U_s (região 2 - segregado total), o leito encontra-se dividido em duas partes, sendo uma próxima ao distribuidor, na qual as partículas finas são maioria e se encontram em um estado fluidizado, enquanto que na parte superior, o leito é composto basicamente por biomassa. Para velocidades abaixo de U_{fa} (região 1 - leito fixo), não há mais movimentação das partículas no leito, sendo indicado por um desvio padrão nulo à velocidade de 0,36 m/s. A U_{fi} só pôde ser determinada para as misturas de tucumã e areia, sendo estas iguais a U_{fa} .



(a) $\bar{d}_b = 508,73 \mu\text{m}$

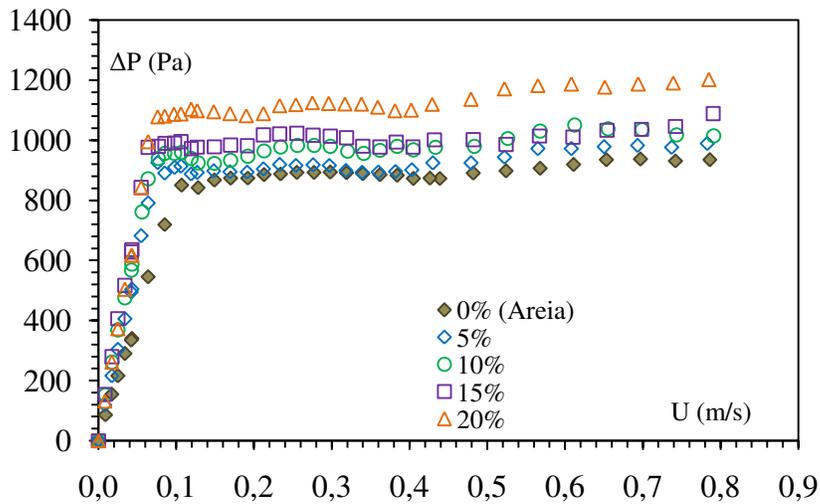


(b) $\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$

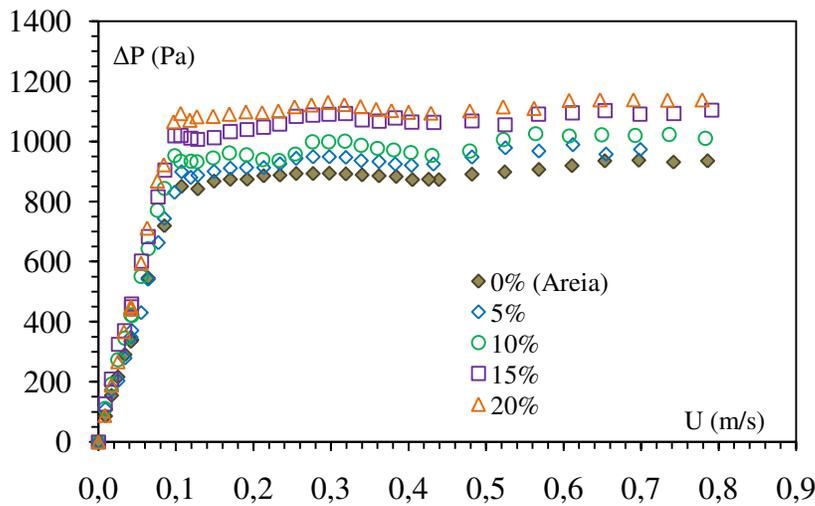


(c) $\bar{d}_b = 1993,71 \mu\text{m}$

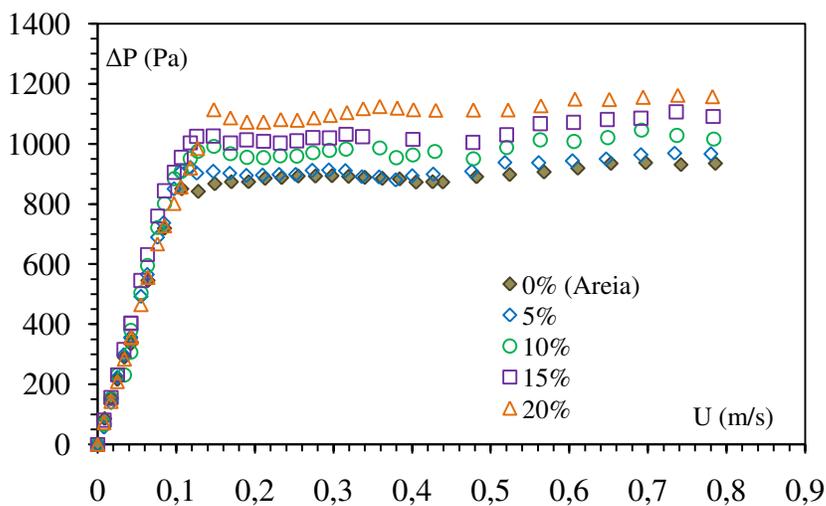
Figura 4.22 Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de eucalipto



(a) $\bar{d}_b = 502,47 \mu\text{m}$



(b) $\bar{d}_b = 1017,46 \mu\text{m}$



(c) $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$

Figura 4.23 Evolução da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de tucumã

Para o caso de maior razão de fração mássica da mistura eucalipto/areia (20 %) (Figura 4.17), observa-se uma redução significativa da amplitude do desvio padrão em comparação a razão de 5 % (Figura 4.15), devido ao aumento do volume de biomassa no leito bloqueando a passagem de ar e com isso dificultando a homogeneidade da mistura.

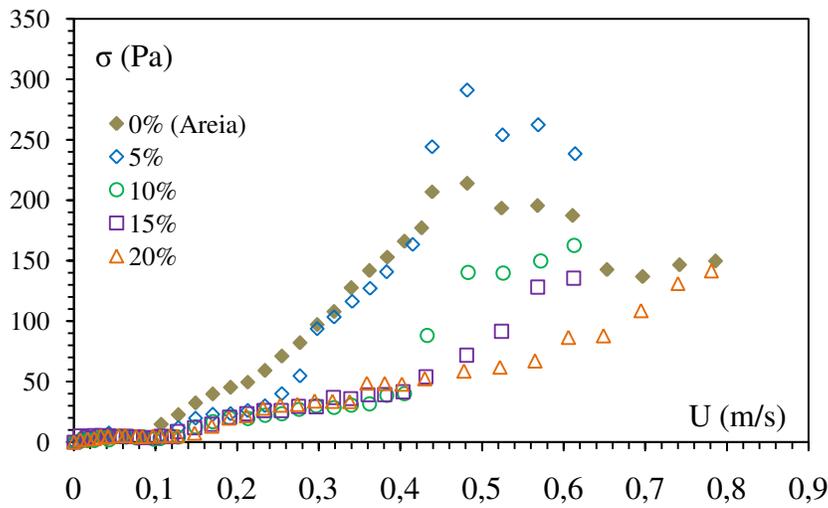
A Figura 4.19, relativa à fração de 5 %, representa a mistura tucumã/inerte com características homogêneas. Consta-se que o desvio das flutuações de pressão diminui acentuadamente de 230 Pa (máx) a 85 Pa, quando a velocidade diminui até a U_{fc} (região 4 – leito efetivamente fluidizado). Depois diminuem gradativamente de 85 Pa a 52 Pa entre U_{fc} e U_s (região 3 - segregado parcial). Em seguida, para velocidades abaixo de U_s , o desvio das flutuações diminui de forma abrupta até atingir U_{fa} ou U_{fi} . Conseqüentemente, encontra-se a região de leito fixo (região 1), sem movimentação das partículas no leito, indicado por um desvio padrão nulo à velocidade de 0,10 m/s.

Para o caso de maior razão de fração mássica da mistura tucumã/areia (20 %) (Figura 4.21), observa-se uma redução mais significativa da amplitude do desvio padrão em comparação a razão de 5 % (Figura 4.19) para a região de segregação total (região 2) variando de 220 Pa a 90 Pa. Isto é justificado pela formação de pistões no leito.

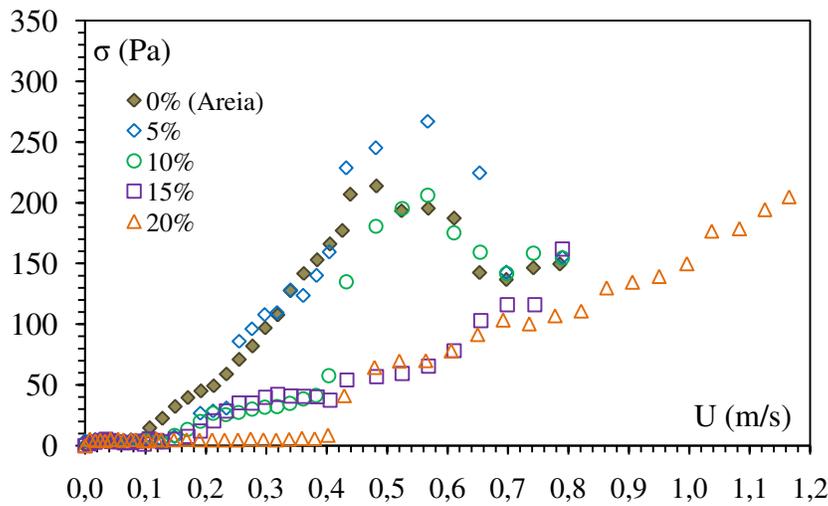
A Figura 4.24 e Figura 4.25 exprimem a influência da razão de fração mássica (5 % a 20 %) sobre o desvio das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás para as biomassas eucalipto e tucumã, respectivamente. Pode-se observar o comportamento dos leitos, desde um leito homogêneo composto somente por inerte (0 % biomassa) até os leitos de misturas entre as respectivas razões de fração mássica.

O perfil do desvio padrão (Figura 4.24) segue uma tendência de um comportamento homogêneo até a razão de fração de 10 % para todos os diâmetros médios (508,73 μm ; 986,67 μm ; 1993,71 μm) do eucalipto. Acima destas condições, as flutuações são influenciadas pela razão de fração mássica da mistura.

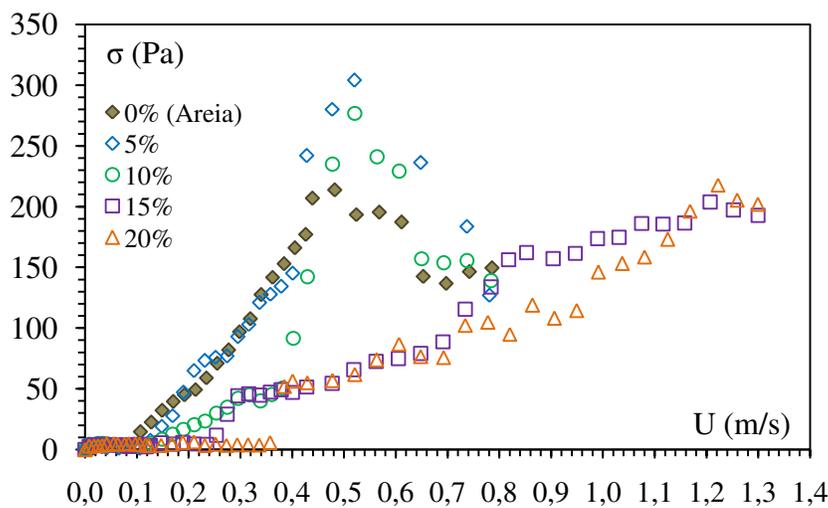
No entanto, para a mistura tucumã/areia (Figura 4.25) verifica-se um aumento do desvio padrão das flutuações de pressão entre as regiões de fluidização e um leve aumento com a razão de fração mássica (5 % a 20 %), devido ao aumento de massa total do leito, sem perder a homogeneidade da mistura.



(a) $\bar{d}_b = 508,73 \mu\text{m}$;

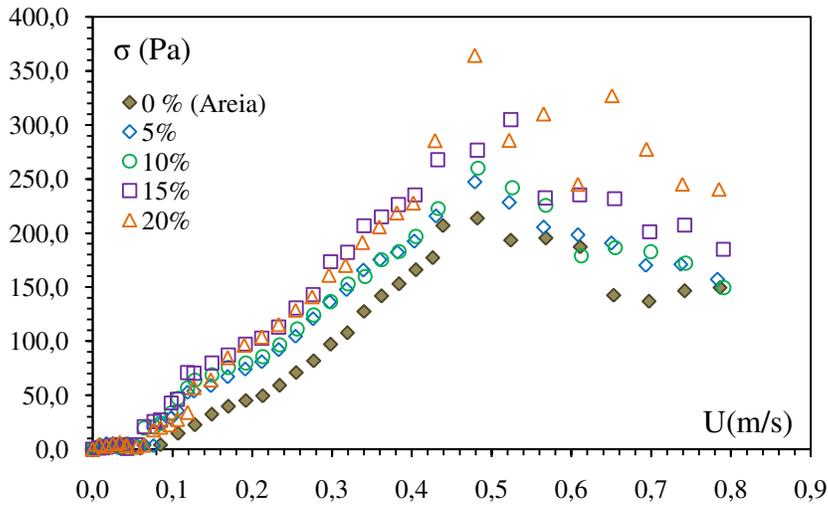


(b) $\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$

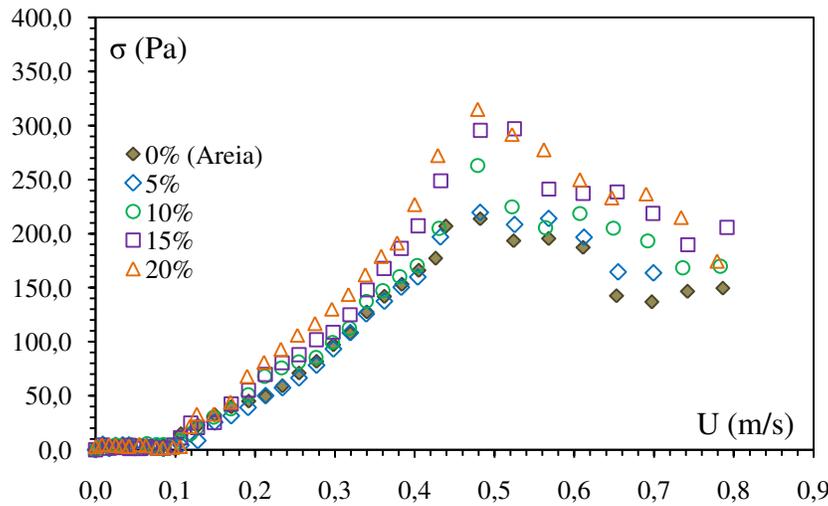


(c) $\bar{d}_b = 1993,71 \mu\text{m}$

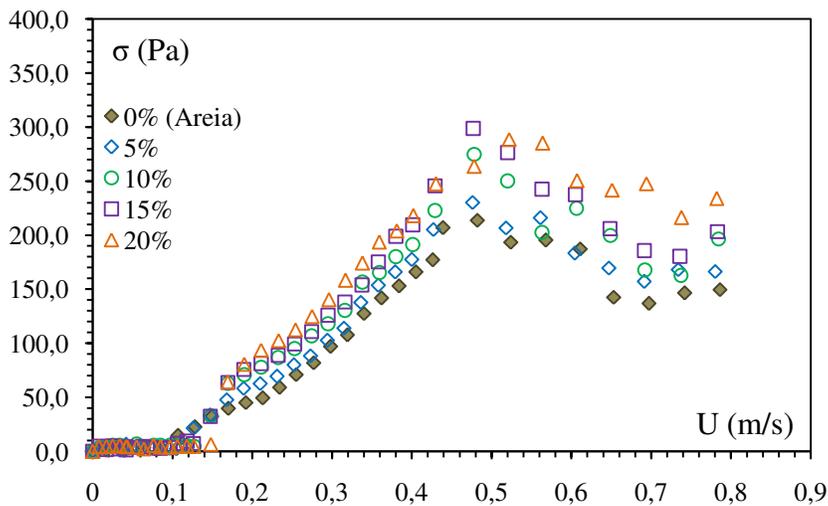
Figura 4.24 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de eucalipto



(a) $\bar{d}_b = 502,48 \mu\text{m}$



(b) $\bar{d}_b = 1017,53 \mu\text{m}$



(c) $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$

Figura 4.25 Evolução do desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de tucumã

4.3.3 Influência da razão de diâmetro médio entre biomassa e inerte

Os resultados dos parâmetros fluidodinâmicos analisados em relação à influência da razão de diâmetro de biomassas ($1,5 < D < 6,0$) nas misturas estão apresentados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

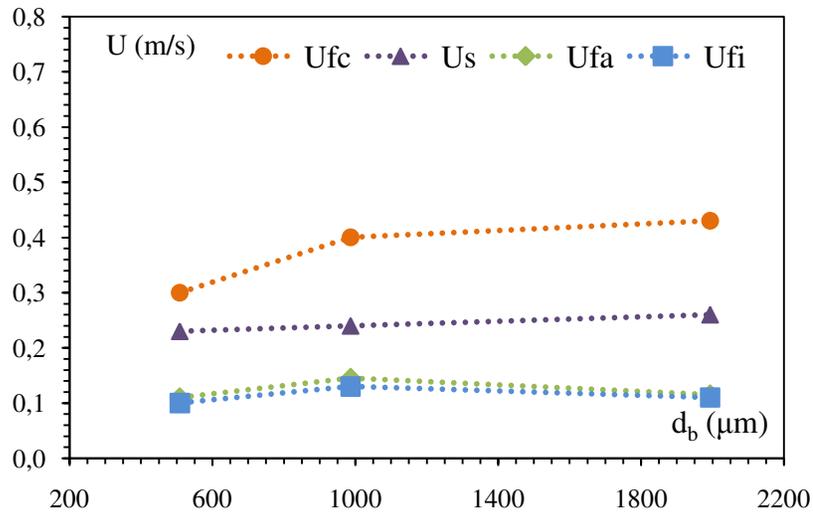
O conjunto de resultados referente às variações das quedas de pressão e desvio padrão, em função da velocidade superficial do gás, pode ser vista para o eucalipto/inerte, nas Figura 4.22 e Figura 4.24, e para o tucumã /inerte nas Figura 4.23 e Figura 4.25.

Para o caso da mistura eucalipto/inerte (Figura 4.26), observa-se que com o aumento do diâmetro médio (aprox. $500 \mu\text{m}$ - $2000\mu\text{m}$), houve um aumento das velocidades características das misturas (U_{fi} , U_{fa} , U_s), sendo este mais significativo (70 – 100 %) para a velocidade de fluidização completa (U_{fc}), nas frações de 15 e 20 %. Para os menores diâmetros (aprox. $500 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$, $D < 3$) e menores frações (5 % e 10 %), observa-se que a U_{fa} tende a um valor constante e próximo a U_{fi} .

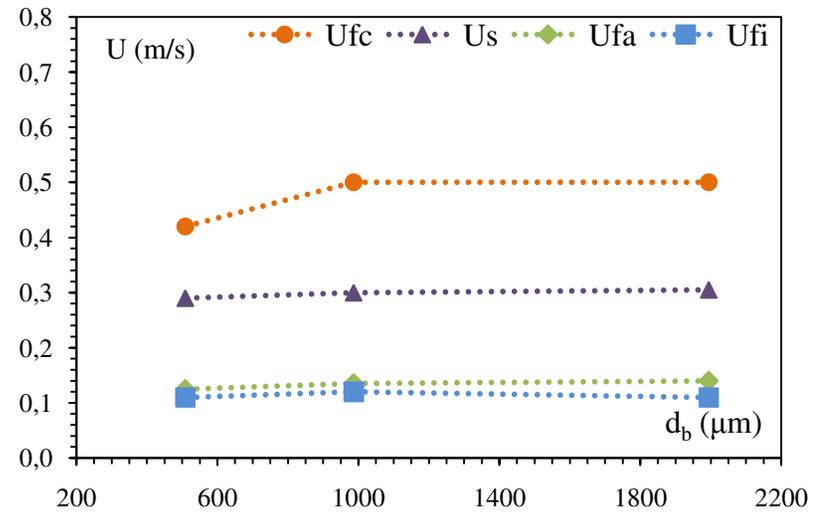
Para o caso da mistura tucumã/inerte (Figura 4.27), observa-se que com o aumento do diâmetro médio, houve uma mesma tendência de aumento das velocidades características das misturas (U_{fi} , U_{fa} , U_s), sendo este mais significativo (39 % - 55%) para a velocidade de fluidização completa (U_{fc}), nas frações entre 10 % e 20 %.

Ressalta-se que para ambas as misturas e diâmetros de aprox. $1000 \mu\text{m}$ e $2000 \mu\text{m}$, as velocidades são praticamente iguais devido a sua classificação de Geldart (B e D) tendendo a características fluidodinâmicas semelhantes.

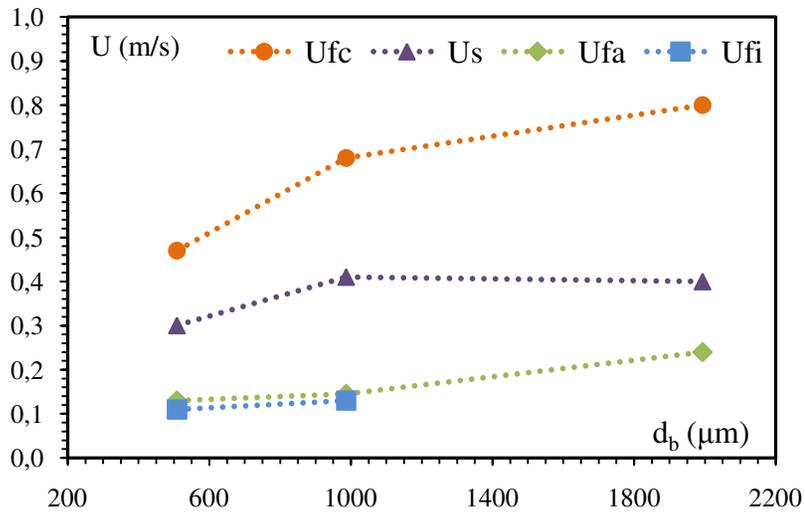
De acordo com Tannous *et al.* (2008, 2009), o aumento das velocidades também foi mais significativo em relação a maior razão de diâmetro médio. Oliveira e Tannous (2009), no entanto, verificou que o efeito da segregação pode provocar um comportamento inverso das partículas. Todas as velocidades analisadas pelos autores (U_{fi} , U_{fa} , U_{fc} , U_s) e ε_{fa} foram maiores para o menor diâmetro de biomassa na mistura, devido ao efeito da segregação total da biomassa na base do leito, enquanto o inerte manteve-se no topo, tornando a fluidização composta basicamente pelo inerte.



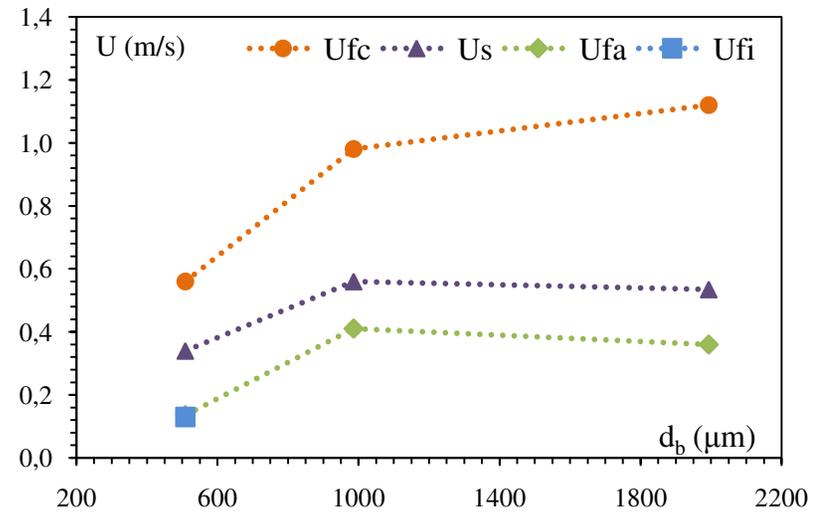
(a) $\chi = 5\%$



(b) $\chi = 10\%$

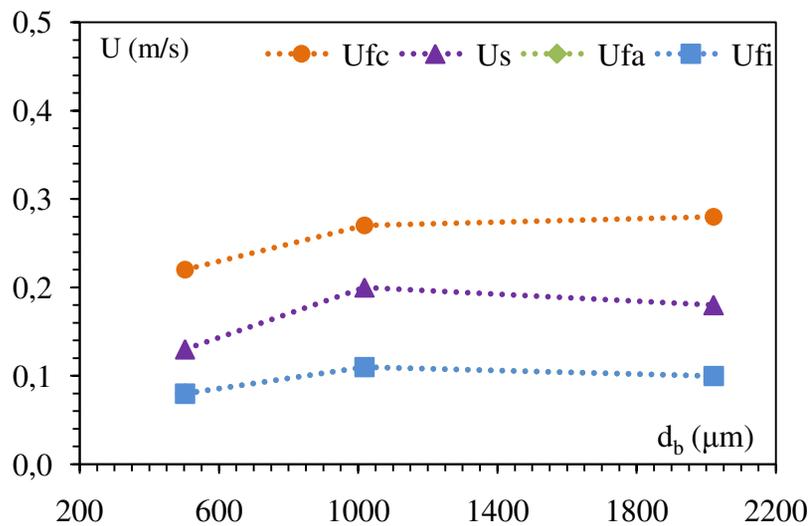


(c) $\chi = 15\%$

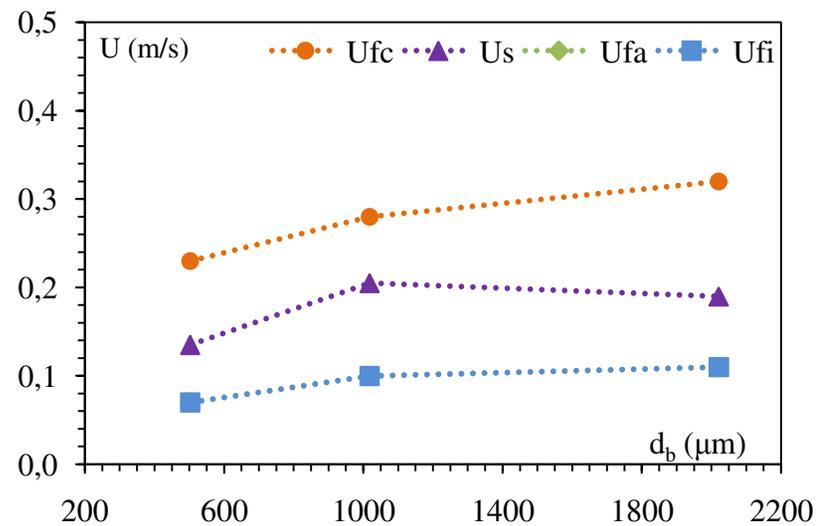


(d) $\chi = 20\%$

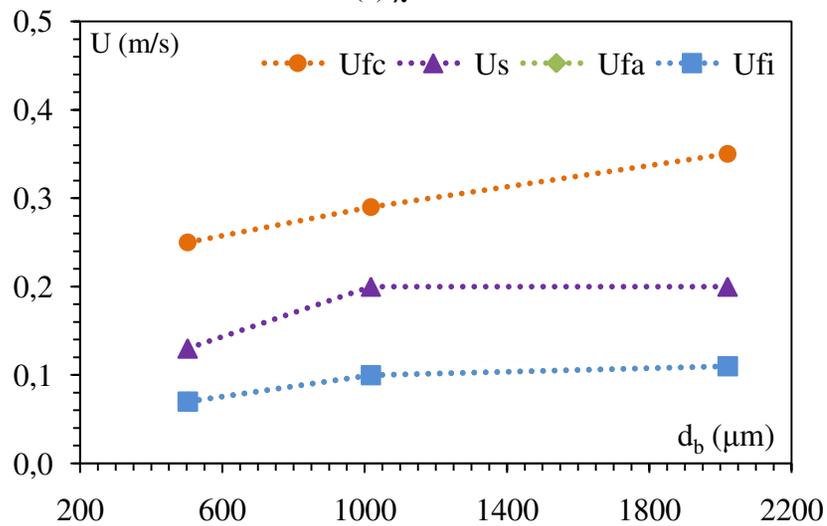
Figura 4.26 Evolução das velocidades características com o diâmetro médio de eucalipto para diferentes frações



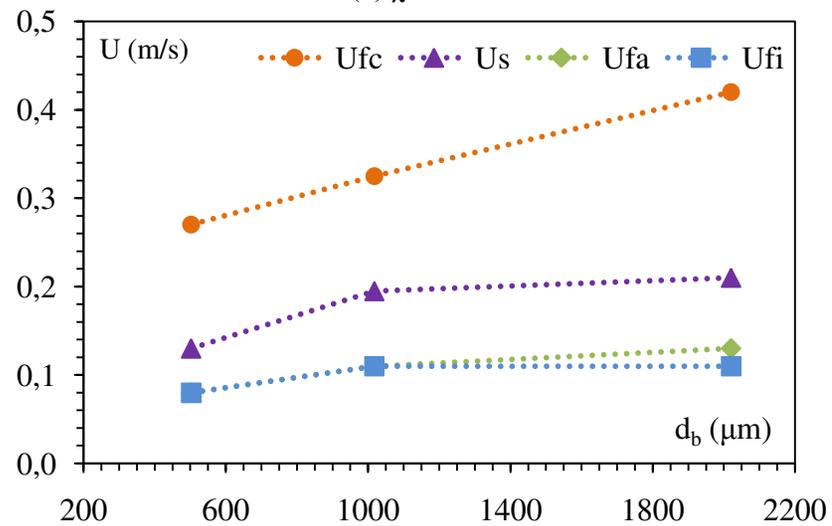
(a) $\chi = 5\%$



(b) $\chi = 10\%$



(c) $\chi = 15\%$



(d) $\chi = 20\%$

Figura 4.27 Evolução das velocidades características com o diâmetro de tucumã para diferentes frações

4.4 Análise comparativa com correlações da literatura

Na Figura 4.28 e Figura 4.29 estão apresentados os erros relativos médios absolutos (ERMA) obtidos através da comparação entre os dados experimentais e os valores preditos por correlações da literatura, em relação às velocidades de fluidização aparente, para as misturas eucalipto/inerte e tucumã/inerte. As equações utilizadas estão apresentadas na Tabela 2.3 (THONGLIMP *et al.*, 1984) e Tabela 2.5 (RAO; BHEEMARASETTI, 2000; MITRI *et al.*, 2011). Ressalta-se que os valores de massa específica e diâmetros médios, referentes às misturas, foram calculados através da equação de Goossens *et al.* (1971), apresentada na Tabela 2.3.

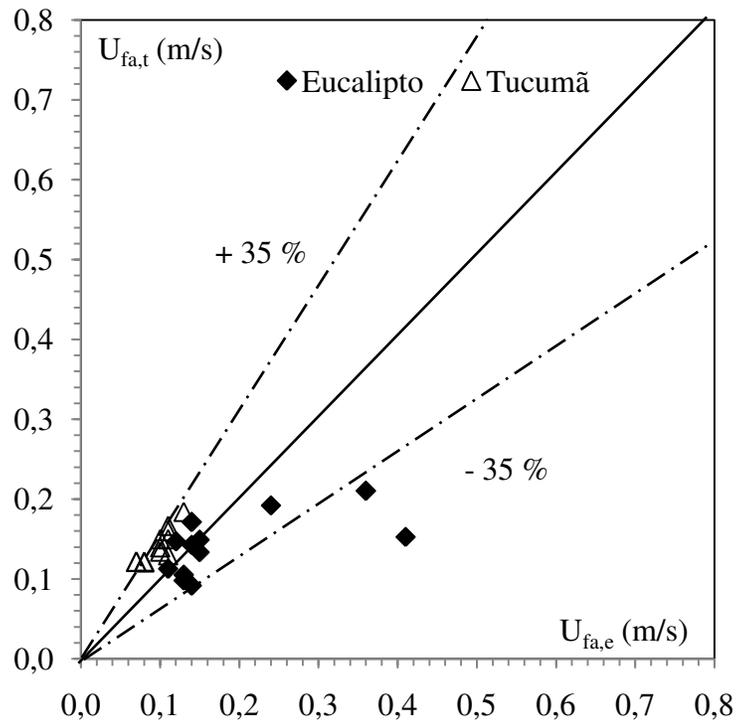
As correlações de Thonglimp *et al.* (1984) representam os dados experimentais com menores ERMAs, de 30 % e 35 %, através das equações para partículas com $Re_p < 20$ e a partir da Equação de Ergun (1952), respectivamente. Isto pode ser atribuído às características dos materiais utilizados pelos autores, que cobrem um grande intervalo de diâmetro médio de partícula (112 - 2125 μm) e de massa específica aparente (2635 – 7425 kg/m^3).

A correlação de Rao e Bheemarasetti (2001), destinada a misturas binárias de biomassa (casca de arroz) e inerte (areia) subestima os valores das velocidades de fluidização aparente, apresentando ERMA de 45 %. Isto pode ser atribuído ao valor da constante k' , definida pelos autores para um pequeno conjunto de dados, contendo apenas quatro pontos experimentais.

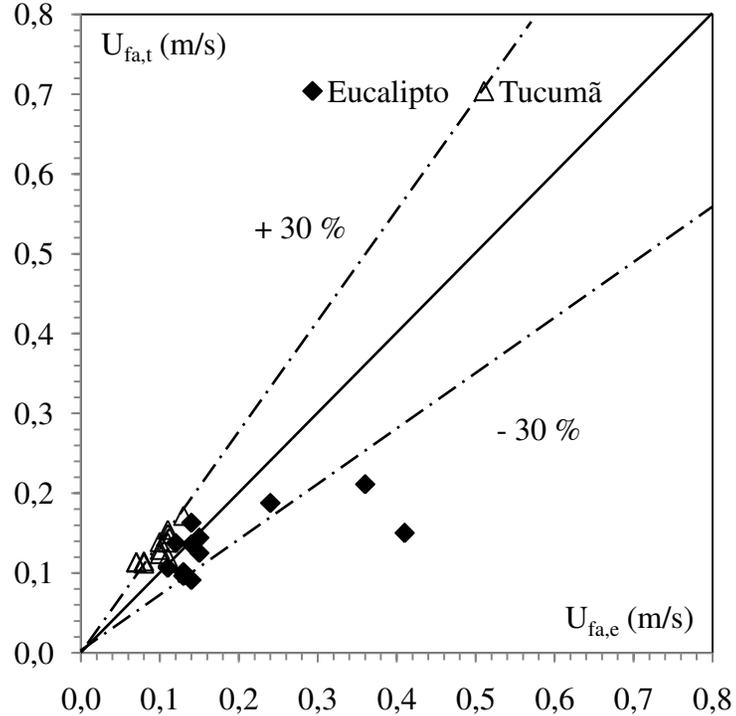
A equação de Mitri *et al.* (2011), também destinada a misturas entre biomassas (casca de arroz e jequitibá rosa) e inertes (areia e alumina), apresentou elevado ERMA (145 %). Parte deste erro está associada ao fato de que a massa específica utilizada pelos autores ter sido a real, e não a aparente, o que implica em um erro. Reformulando a equação, considerando a massa específica aparente, o ERMA encontrado foi de 136 %, ainda elevado. Sendo assim, novos parâmetros de ajustes, como a esfericidade das partículas, devem ser considerados para melhorar esta equação.

Tabela 4.5 Comparativo entre Re_{fa} teórico e experimental (ERMA)

Equação	ERMA (%)
Thonglimp <i>et al.</i> (1984) a partir da equação de Ergun (1952)	35
Thonglimp <i>et al.</i> (1984) para $Re < 20$	30
Rao e Bhemarasetti (2001)	45
Mitri <i>et al.</i> (2011)	145

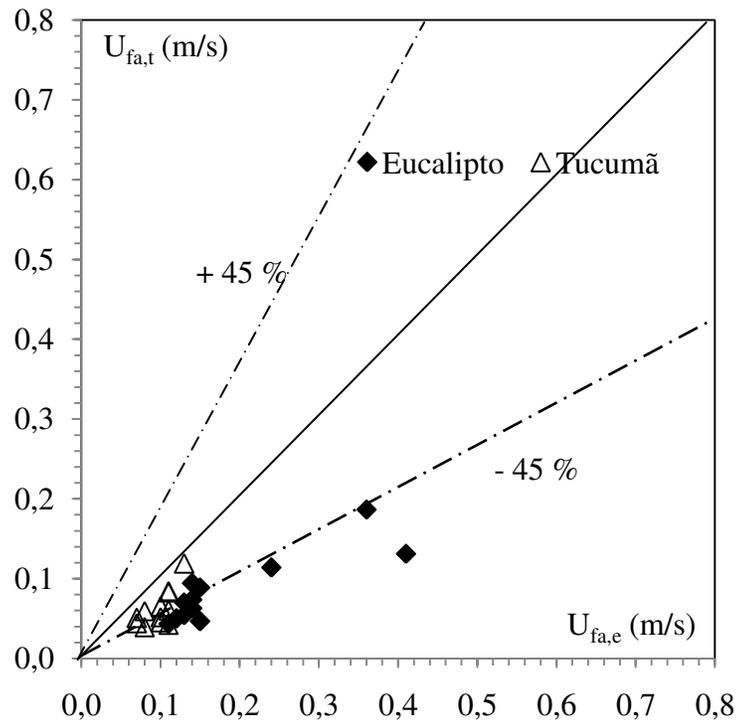


(a) Thonglimp *et al.* (1984) a partir da Equação de Ergun (1952)

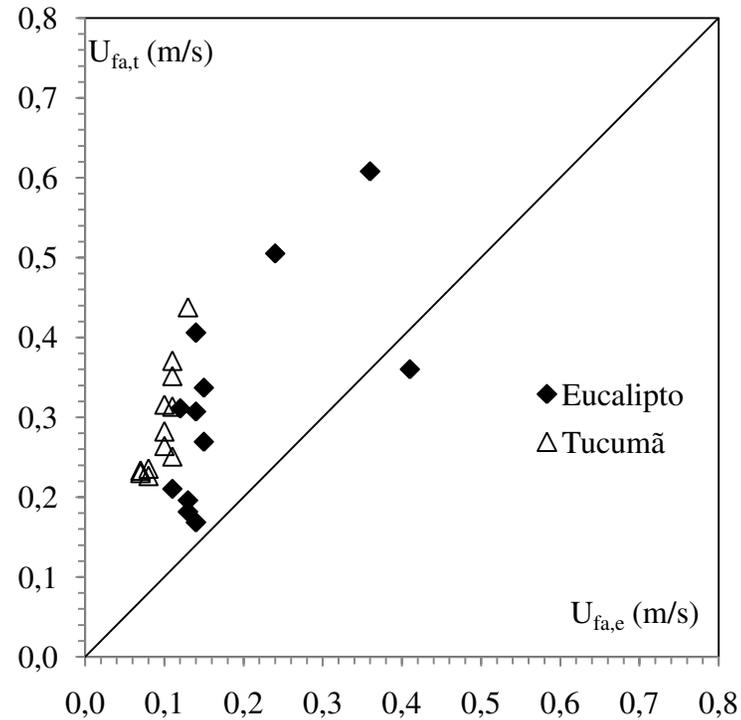


(b) Thonglimp *et al.* (1984) para com $Re_p < 20$

Figura 4.28 Comparação entre os valores das velocidades de fluidização aparente obtidas experimentalmente ($U_{fa,e}$) e por correlações da literatura ($U_{fa,t}$)



(a) Rao e Bheemarasetti (2001)



(b) Mitri *et al.* (2011)

Figura 4.29 Comparação entre os valores das velocidades de fluidização aparente obtidas experimentalmente ($U_{fa,e}$) e por correlações da literatura ($U_{fa,t}$)

4.5 Proposta de faixas de operação para obtenção de misturas entre biomassa/inerte

Partindo dos valores experimentais deste trabalho, em conjunto com dados da literatura referentes a misturas de biomassa e inerte (OLIVEIRA; TANNOUS, 2009; TANNOUS; MIZONOV, 2008; MITRI *et al.*, 2011), puderam-se observar diferentes faixas de operação para leitos fluidizados, mediante parâmetros fluidodinâmicos representativos (número de Reynolds e Arquimedes). Buscou-se estabelecer limites que possam auxiliar na determinação de condições favoráveis de mistura para o projeto de reatores de leitos fluidizados.

Nas Figura 4.30 e Figura 4.31, apresentam-se os limites do número de Reynolds na fluidização aparente ($1 < Re_{fa} < 20$) e completa ($1 < Re_{fc} < 37$), em função do Número de Arquimedes, de $200 < Ar_m < 12500$, para os dois casos, considerando a massa específica e diâmetro médio de mistura de acordo com Goossens *et al.* (1971).

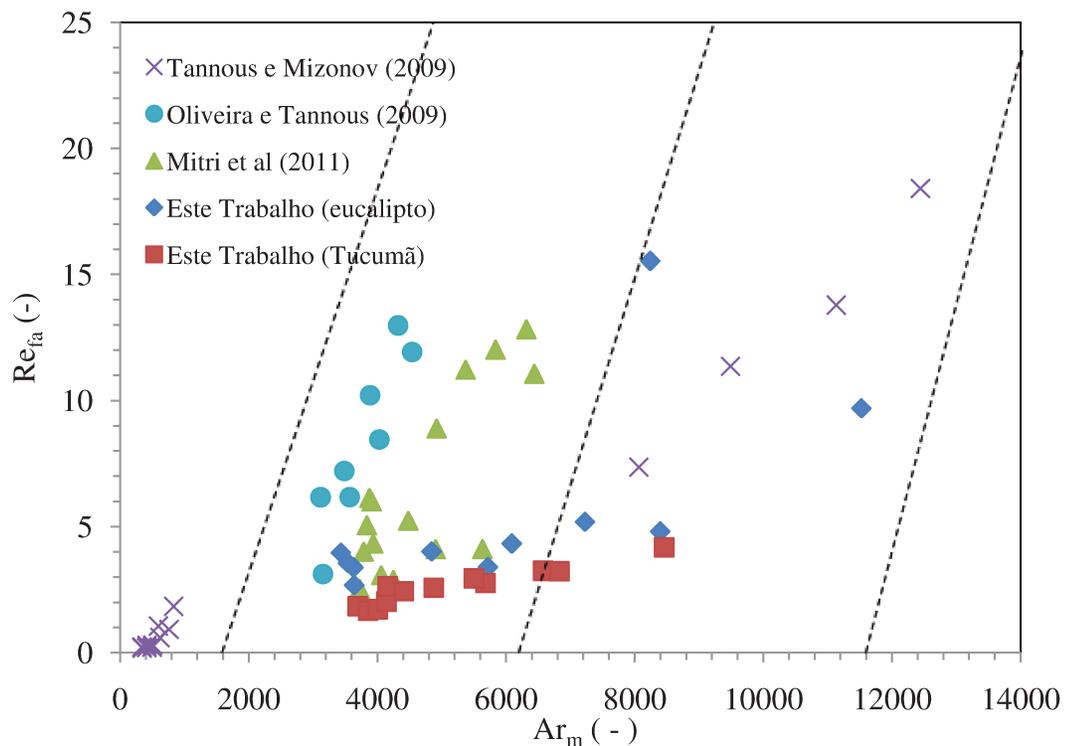


Figura 4.30 Número de Reynolds fluidização aparente em função do número de Arquimedes para diferentes misturas de biomassa e inerte

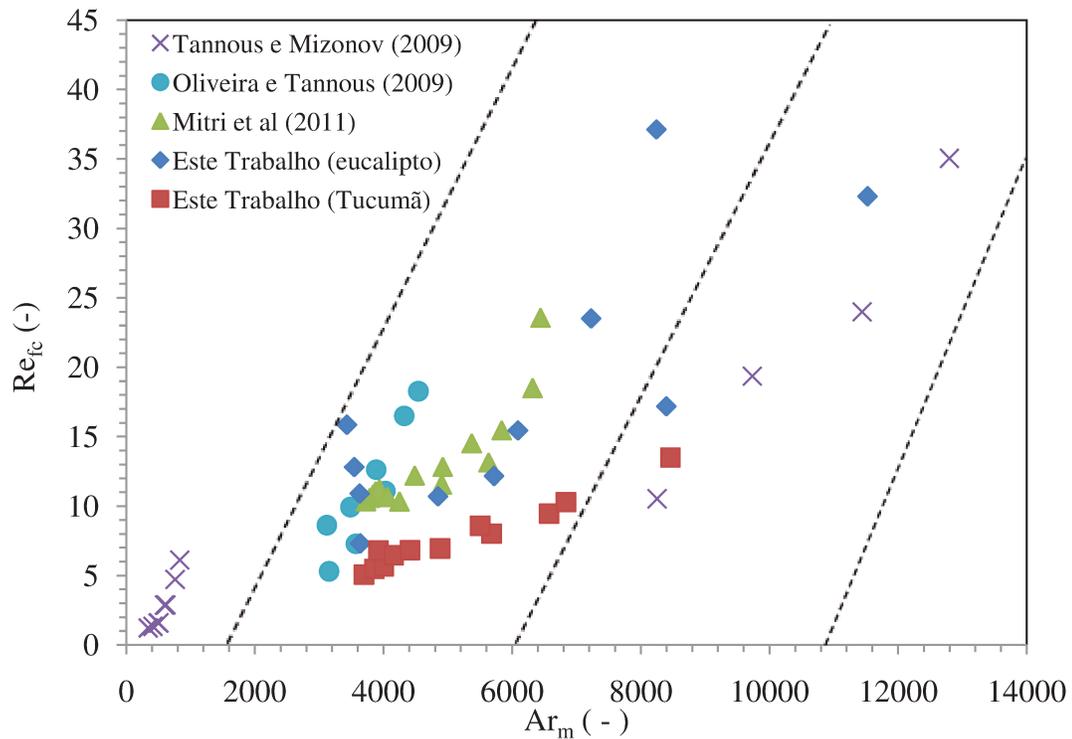


Figura 4.31 Número de Reynolds na fluidização completa em função do número de Arquimedes para diferentes misturas de biomassa e inerte

4.6 Elaboração de novas correlações

A evolução do número de Reynolds na fluidização aparente e completa, em função do número de Arquimedes, para as misturas estudadas neste trabalho e misturas de biomassa e inerte encontradas na literatura, conforme Figura 4.30 e Figura 4.31 (Tabela 4.3, Tabela 4.4 e APÊNDICE B) podem ser descritas, com melhor ajuste, na forma de uma equação em série de potência:

$$Re_{fa} \text{ e } Re_{fc} = jAr_m^k \quad (4.5)$$

Através de equações de ajuste em série de potência, foram identificadas as constantes j e o expoente k , para os números de Reynolds nas condições de fluidização aparente e completa, resultando nas Equações 4.6 e 4.7. Os erros obtidos para estas equações aplicados as biomassas deste trabalho e da literatura estão apresentados na Figura 4.32a e Figura 4.33a.

$$Re_{fa} = 0,0005Ar_m^{1,0769} \quad R^2 = 0,77 \quad (4.6)$$

$$Re_{fc} = 0,0123Ar_m^{0,8086} \quad R^2 = 0,83 \quad (4.7)$$

Duas outras correlações foram estabelecidas, baseadas na equação de Ergun (1952), para considerando as constantes K_1 e K_2 definidas nas Equações 2.9 e 2.10.

$$Re = [C_1^2 - C_2Ar_m]^{1/2} - C_1 \quad (4.8)$$

onde

$$C_1 = \frac{K_2}{2K_1} \quad (4.9) \quad C_2 = \frac{1}{K_1} \quad (4.10)$$

As esfericidades foram consideradas como uma média entre as esfericidades das partículas de biomassa e inerte, e os valores das porosidades utilizados correspondentes aos experimentais, determinados conforme item 3.6.5. Os erros obtidos ao aplicar estas equações para as misturas deste trabalho e em conjunto com dados da literatura são apresentados nas Figura 4.32b e Figura 4.33b.

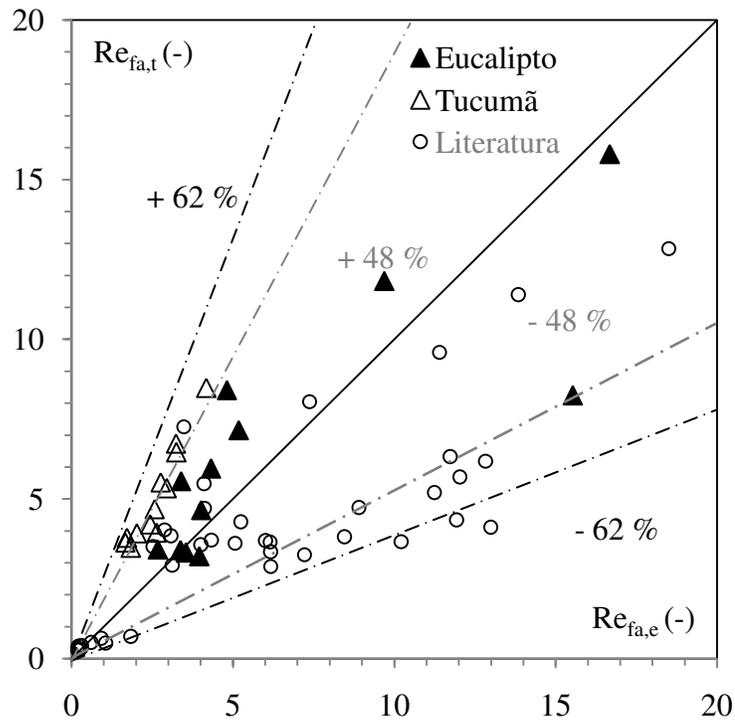
$$Re_{fa} = [32,9^2 + 0,0402Ar_m]^{1/2} - 32,9 \quad (4.11)$$

$$Re_{fc} = [18,8^2 + 0,134Ar_m]^{1/2} - 18,8 \quad (4.12)$$

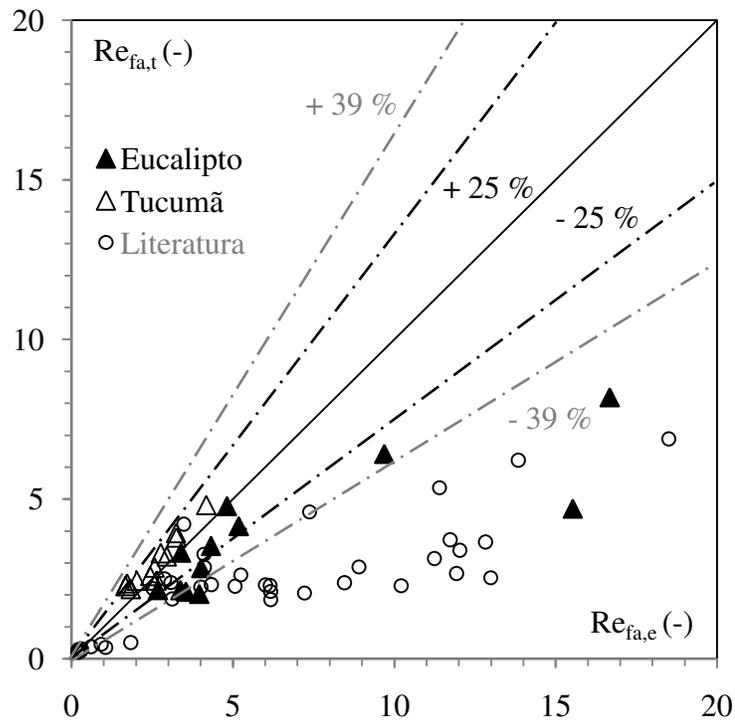
Os erros encontrados foram, de 25 % a 62 % para Re_{fa} e de 29 % a 51 % para Re_{fc} , o que pode ser explicado pelas características dispersas das biomassas consideradas (Figura 4.30 e Figura 4.31). Na Tabela 4.6 estão reunidos os erros encontrados para todas as equações propostas. De acordo com o presente estudo, sugere-se o uso da Equação baseada no trabalho de Ergun (1952) para Re_{fa} e a encontrada pelo método dos mínimos quadrados para Re_{fc} .

Tabela 4.6 Correlações empíricas propostas aplicadas para misturas de biomassas

Equação	ERMA (%)	
	Este trabalho	Dados da literatura
$Re_{fa} = 0,0005Ar_m^{1,0769}$	62	48
$Re_{fa} = [32,9^2 + 0,0402Ar_m]^{1/2} - 32,9$	25	39
$Re_{fc} = 0,0123Ar_m^{0,8086}$	44	29
$Re_{fc} = [18,8^2 + 0,134Ar_m]^{1/2} - 18,8$	51	30

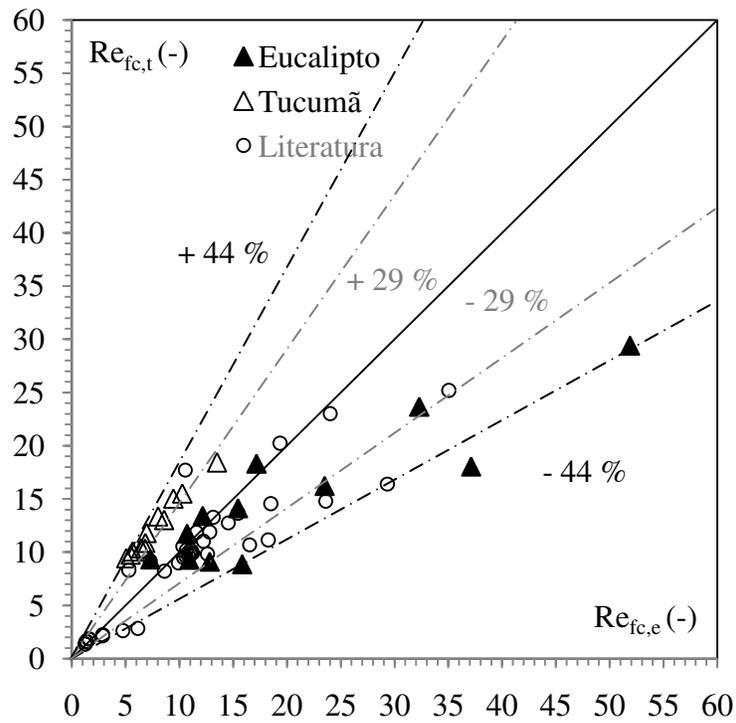


(a) $Re_{fa} = 0,0005Ar_m^{1,0769}$

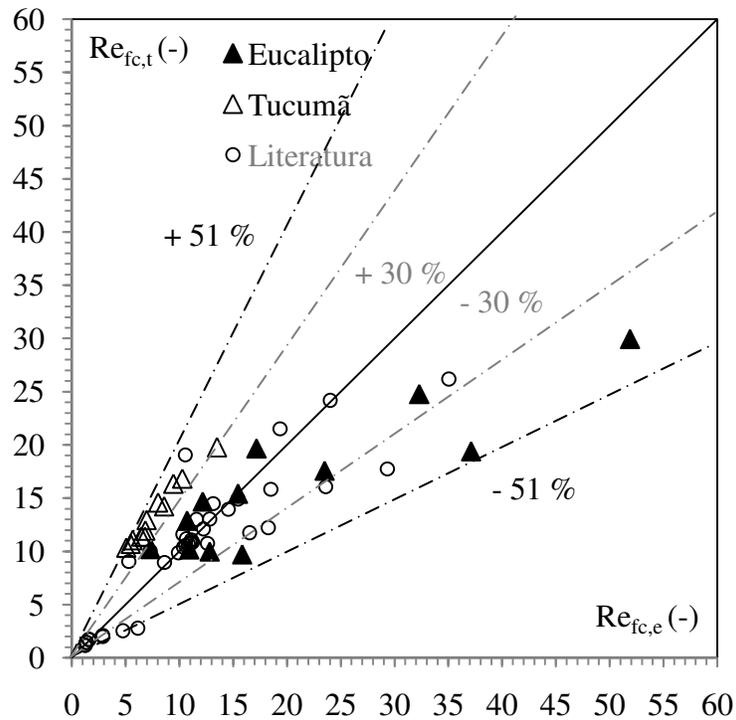


(b) $Re_{fa} = [32,9^2 + 0,0402Ar_m]^{1/2} - 32,9$

Figura 4.32 Comparação dos resultados experimentais e teóricos para o número de Reynolds na fluidização aparente calculado pelo método dos mínimos quadrados (a) e a partir da equação de Ergun (b)



(a) $Re_{fc} = 0,0123Ar_m^{0,8086}$



(b) $Re_{fc} = [18,8^2 + 0,134Ar_m]^{1/2} - 18,8$

Figura 4.33 Comparação dos resultados experimentais e teóricos para o número de Reynolds na fluidização completa calculado pelo método dos mínimos quadrados (a) e a partir da equação de Ergun (b)

4.7 Porosidades aparentes e completas

Para o eucalipto, observa-se que as porosidades de fluidização aparente (ε_{fa}) e completa (ε_{fc}) são mais influenciadas pelo aumento da fração de biomassa na mistura do que com o diâmetro desta. Considerando toda a faixa de diâmetro estudada neste trabalho (1,5 - 6), o aumento máximo de ε_{fa} e ε_{fc} foi de 19% e 13%, respectivamente. Para a faixa de variação de fração analisada ($5\% < \chi < 20\%$), observa-se que o aumento máximo foi de 41% para a ε_{fa} e em cerca de 200 % para ε_{fc} . Isto pode ser atribuído a grande presença de pistões formados no leito para elevadas frações de biomassa, com o aumento da velocidade necessária para fluidizar estas misturas. Avaliando os dados obtidos, os leitos chegaram a alcançaram a altura de 80 cm, em relação a um leito fixo de altura máxima de 18,5 cm para a mistura eucalipto/inerte ($\chi = 20\%$, $D = 6$).

Para o caroço do fruto do tucumã, a ε_{fa} diminui em 5,1 %, enquanto a ε_{fc} aumenta em 10,8 %, com a variação do diâmetro de 1,5 para 6,1. Com a variação da fração ($5\% < \chi < 20\%$), as duas porosidades aumentaram, em 16,2 % e 10,8 %, para ε_{fa} e ε_{fc} , respectivamente. Estes valores estão muito abaixo dos encontrados para o eucalipto. Isto se deve a pouca variação de volume causada pelo acréscimo de massa de tucumã no leito, quando comparada ao eucalipto. Isto pode ser comprovado pela altura máxima do leito fixo do tucumã para os maiores diâmetros e frações ($D = 6$, $\chi = 20\%$), de 9,5 cm, praticamente metade da altura nas condições correspondentes para o eucalipto (18,5 cm).

4.8 Expansão dos leitos de misturas

As Figura 4.34 e Figura 4.35 representam a influência da razão de fração mássica sobre a evolução da expansão do leito em função da velocidade superficial do gás, para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã, respectivamente.

Através da Figura 4.34 para a mistura eucalipto/inerte, observa-se que as expansões das misturas binárias apresentam uma mesma tendência a velocidades baixas e próximas à velocidade de fluidização inicial, para as razões de fração até 15 %. Ento esta velocidade e a velocidade de fluidização completa destas misturas, pode-se observar um desvio entre as razões de fração, e este desvio é aumentando à medida que o diâmetro de partícula aumenta.

Para a razão de fração mássica de 20 %, observa-se um decaimento mais pronunciado da expansão com o aumento do diâmetro, em relação às outras misturas. Além da velocidade de

fluidização completa, as curvas tendem a uma sobreposição, independente das razões de fração mássica.

Para a mistura tucumã/inerte (Figura 4.35), as expansões são bastante semelhantes e sofreram pouca influência com a razão de fração mássica.

Quanto à influência do diâmetro médio da mistura, o conjunto dos resultados obtidos está apresentado nas Figura 4.36 e Figura 4.37 para o eucalipto e o caroço do fruto do tucumã, respectivamente.

Na Figura 4.36 é mostrada a expansão dos leitos compostos de misturas eucalipto/inerte, para diferentes diâmetros, comparativos a mesma fração mássica. Verifica-se que a influência do diâmetro é potencializada com o aumento da fração mássica de eucalipto no leito, e verifica-se que a expansão é mais significativa para os menores diâmetros.

Com relação ao caroço do fruto do tucumã (Figura 4.37), pode-se dizer que a expansão é influenciada, e de forma pouco acentuada, para o diâmetro de 2017,37 μ m da biomassa, sendo que para os outros a tendência é mantida com poucas variações com a fração.

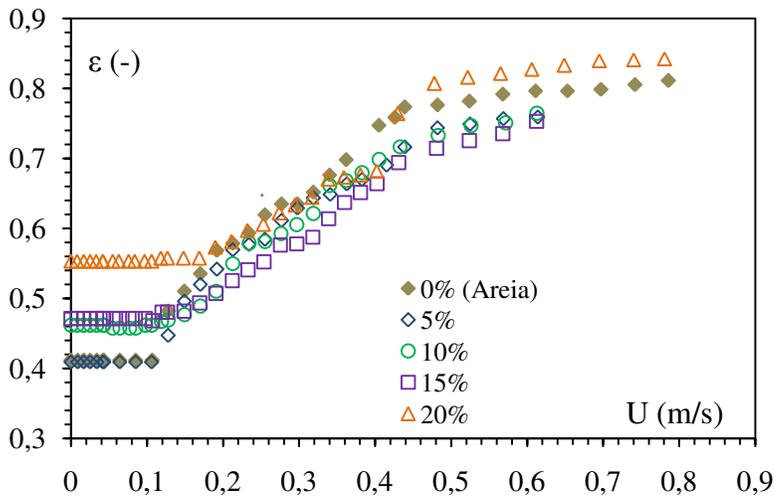
Para efeito comparativo, a Equação 4.13 (TANNOUS *et al.*, 1994) desenvolvida para partículas grandes e homogêneas, foi testada para predizer o comportamento da expansão do leito composto pelas misturas eucalipto/inerte e tucumã/inerte.

$$\varepsilon = 0,46Re^{0,43}Ar_m^{-0,22}Mv^{0,12} \quad (4.13)$$

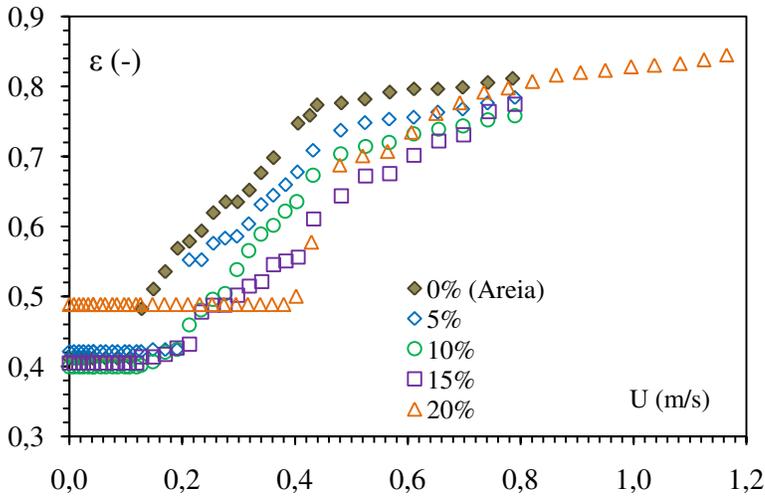
A variável Mv é o número de massa específica, definido de acordo com a Equação 4.14, onde $\rho_{p,m}$ é o diâmetro médio da mistura, de acordo com Goossens (1971) (Tabela 2.3).

$$Mv = \frac{\rho_{p,m} - \rho_g}{\rho_g} \quad (4.14)$$

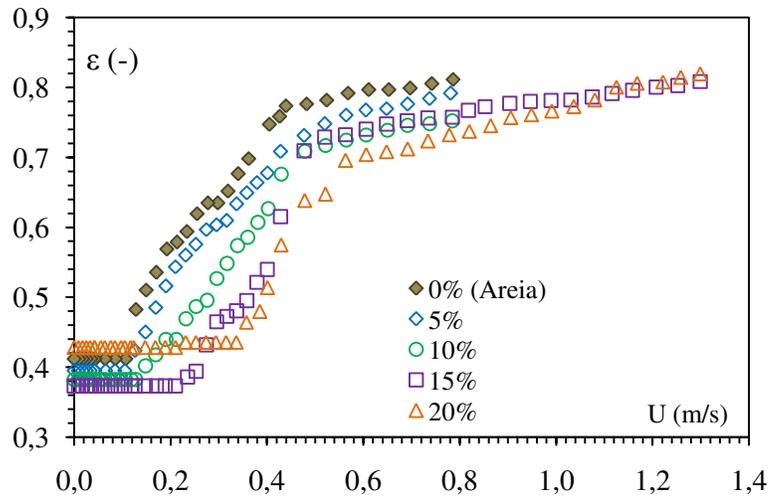
Considerando as misturas eucalipto/inerte, o ERMA máximo encontrado foi de 34 %, enquanto que para a mistura tucumã/inerte, de 36 %. Como pode ser visto entre as Figura 4.38 e Figura 4.40, a Equação 4.13 subestima os valores da expansão do leito, o que pode estar relacionado ao fato de a equação de Tannous *et al.* (1994) ser destinada a misturas heterogêneas de inertes, e não de biomassas, cujas propriedades são bastante diferenciadas, principalmente em relação a massa específica e esfericidade, como pode ser observado na Tabela 4.1. De qualquer forma, esta equação fornece uma aproximação do comportamento da expansão em um leito.



(a) $\bar{d}_b = 508,73 \mu\text{m}$

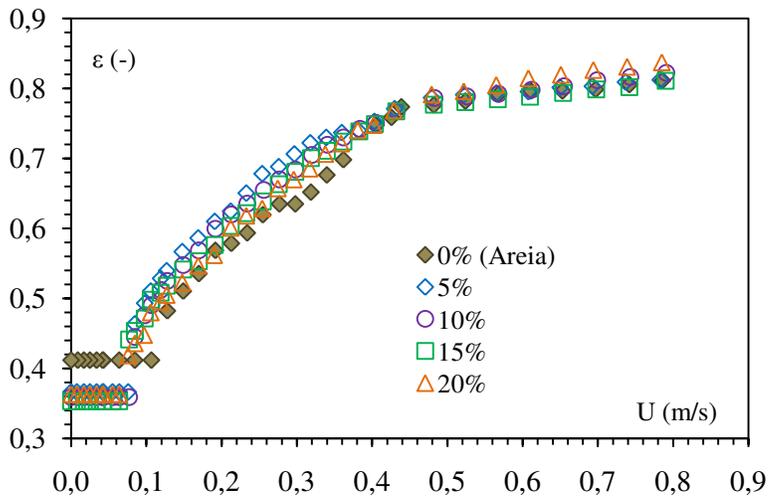


(b) $\bar{d}_b = 986,67 \mu\text{m}$

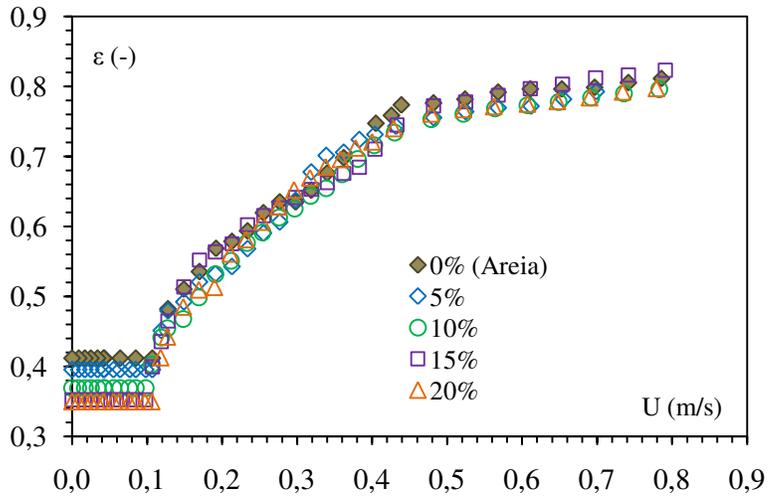


(c) $\bar{d}_b = 1993,71 \mu\text{m}$

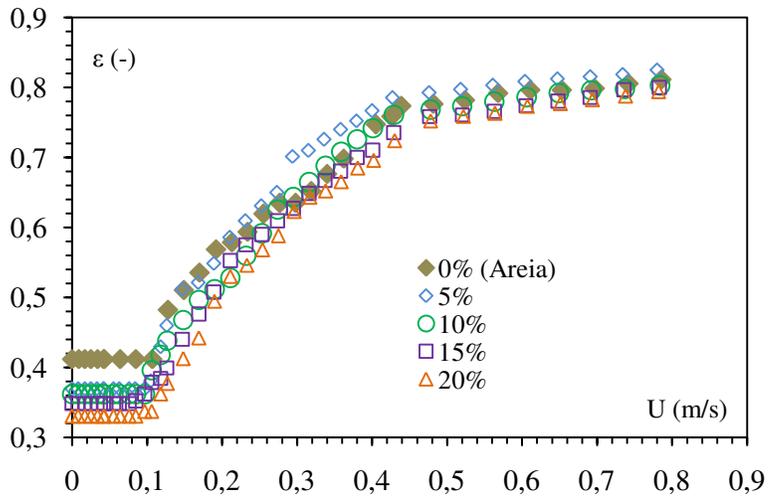
Figura 4.34 Evolução da porosidade do leito em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de eucalipto



(a) $\bar{d}_b = 502,48 \mu\text{m}$



(b) $\bar{d}_b = 1017,53 \mu\text{m}$



(c) $\bar{d}_b = 2017,37 \mu\text{m}$

Figura 4.35 Evolução da porosidade do leito em função da velocidade superficial do gás - diferentes frações mássicas e diâmetros médios de caroço do fruto do tucumã

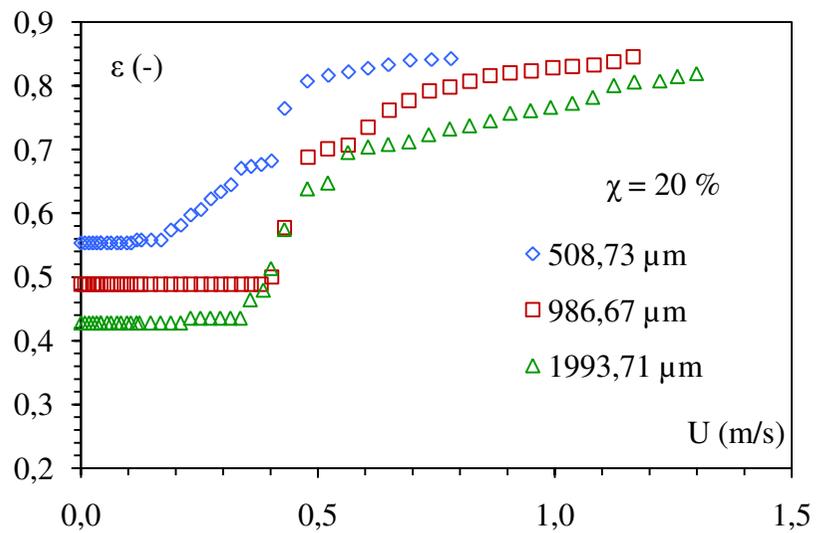
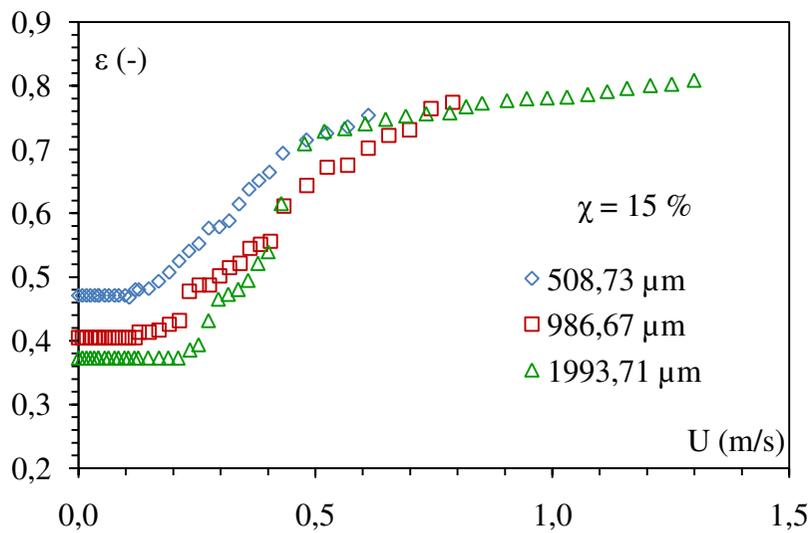
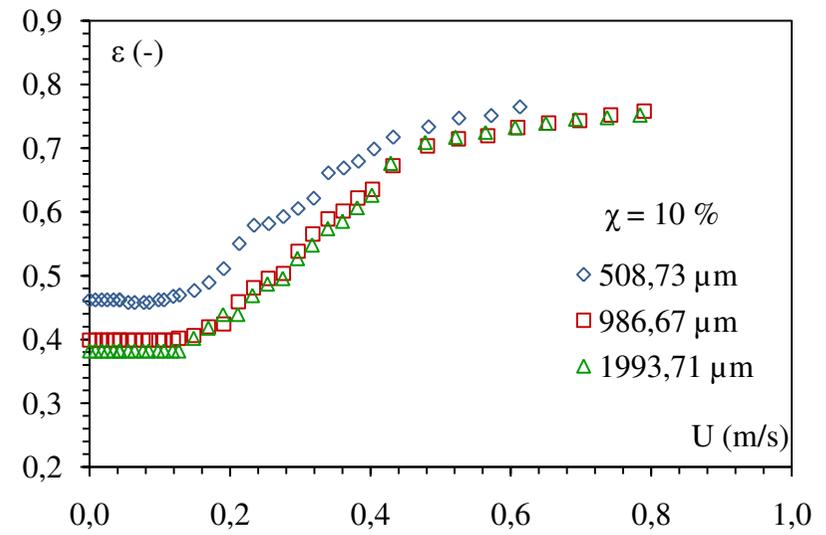
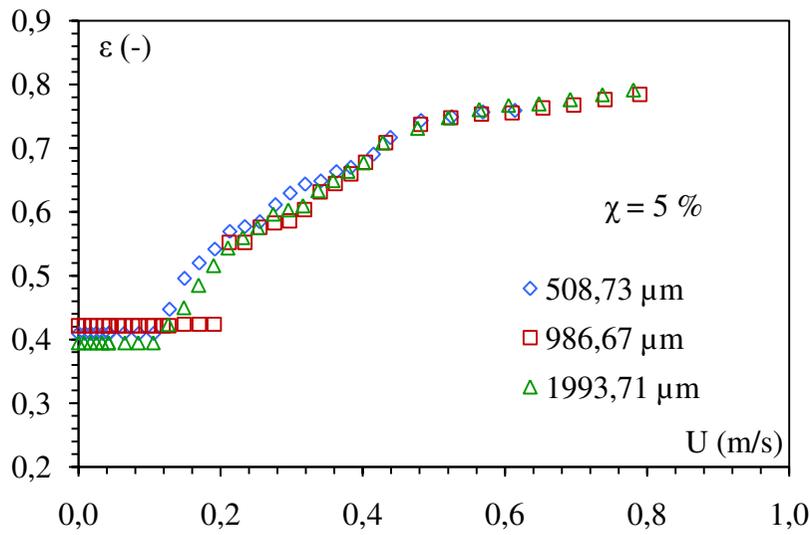


Figura 4.36 Evolução da expansão do leito em função da velocidade superficial do gás para diferentes diâmetros médios de eucalipto na mistura

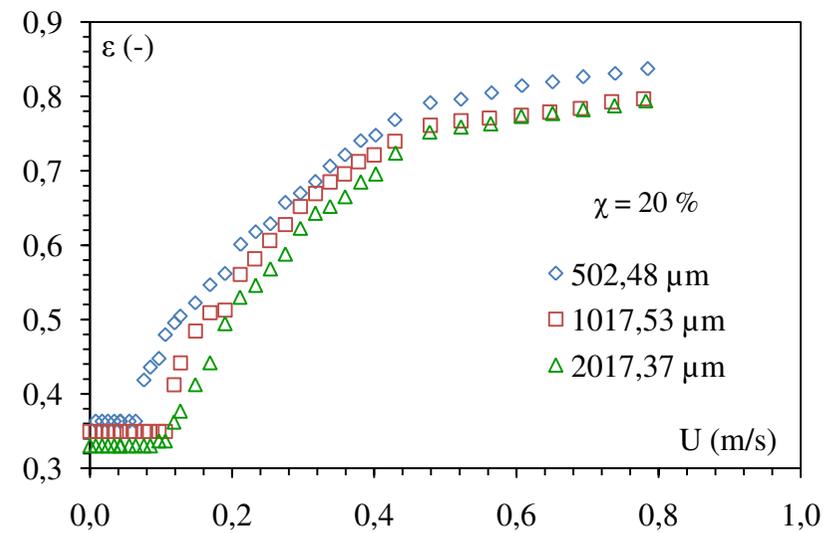
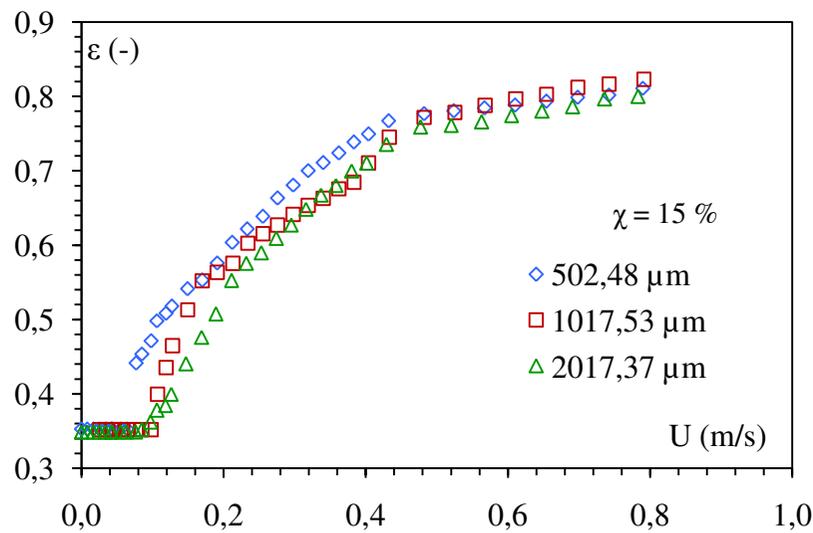
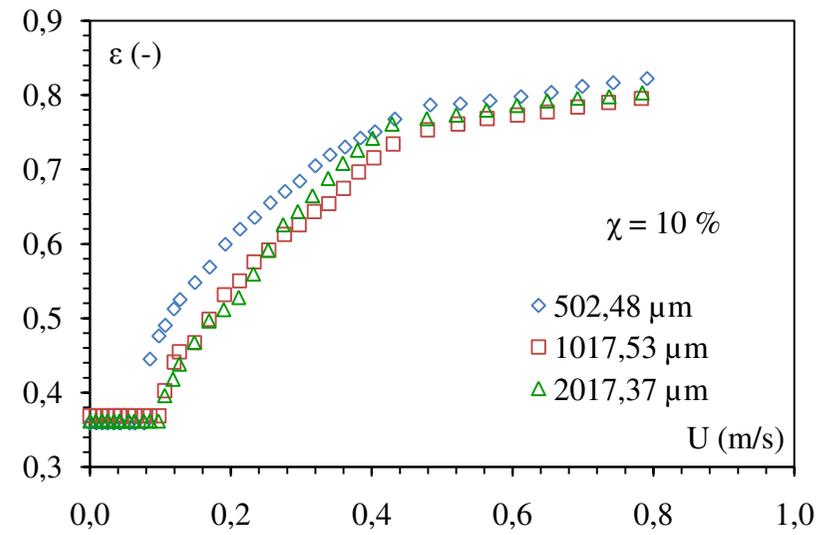
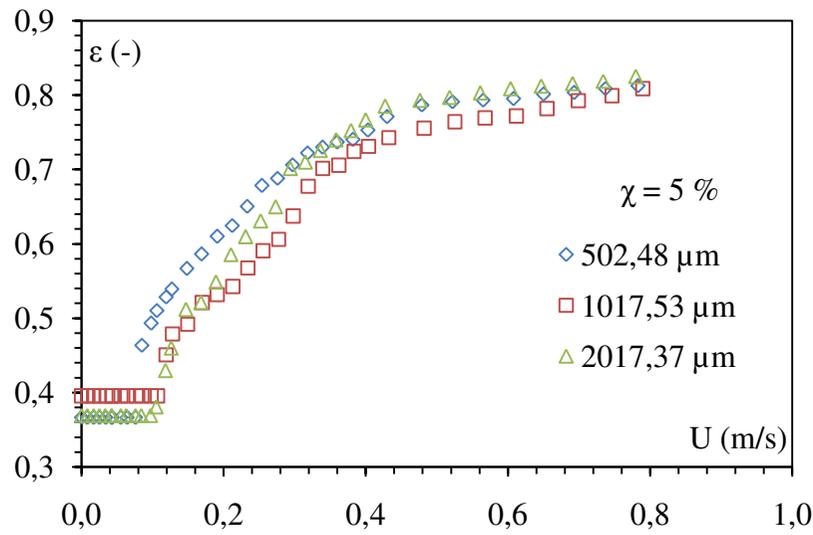
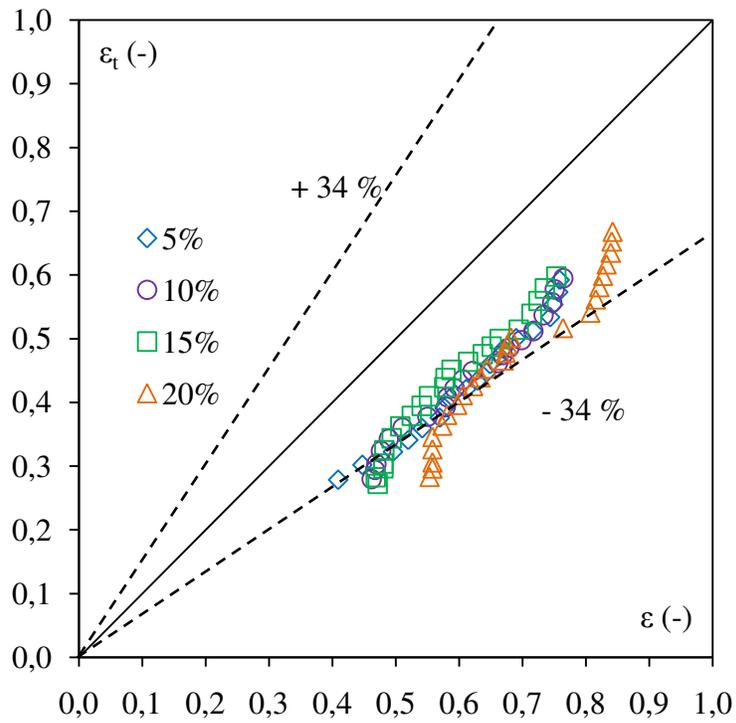
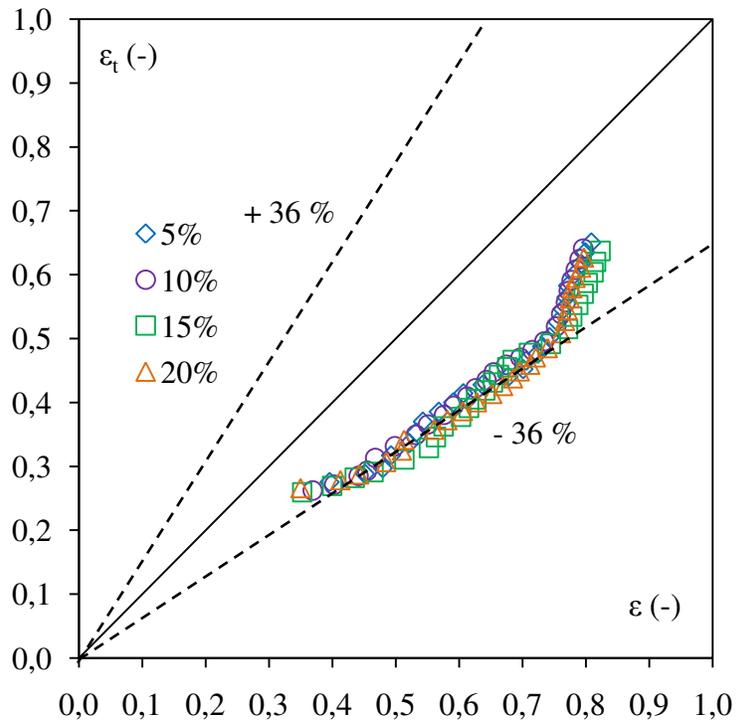


Figura 4.37 Evolução da expansão do leito em função da velocidade superficial do gás para diferentes diâmetros médios do caroço do fruto do tucumã

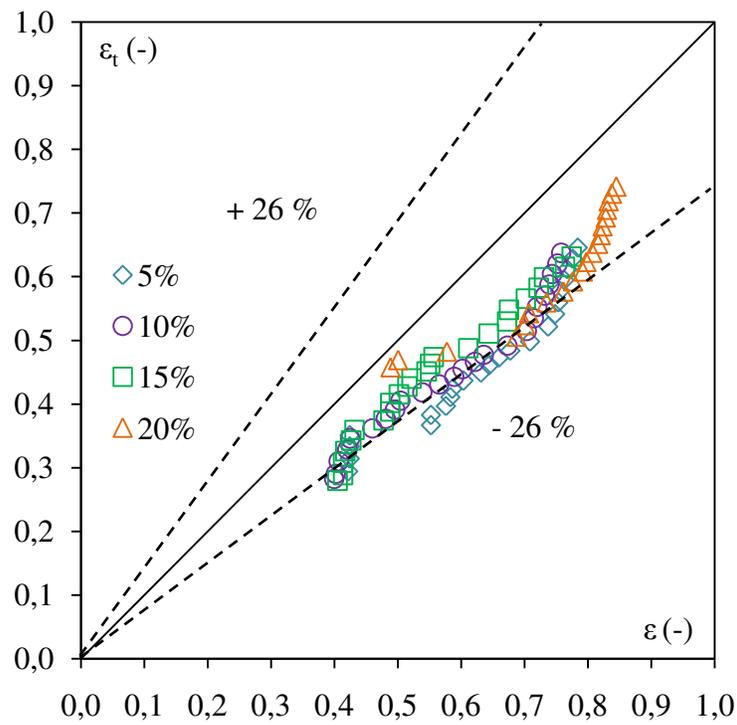


(a) Mistura eucalipto/inerte

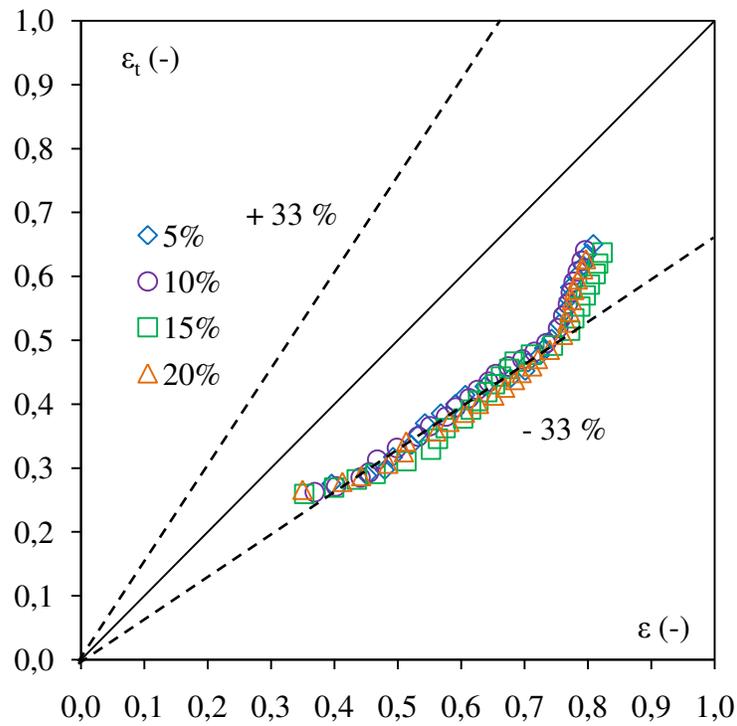


(b) Mistura tucumã/inerte

Figura 4.38 Comparativo de dados experimentais e teóricos pela equação de Tannous *et al.* (1994) aplicada a misturas biomassa/inerte ($D = 1,5$)

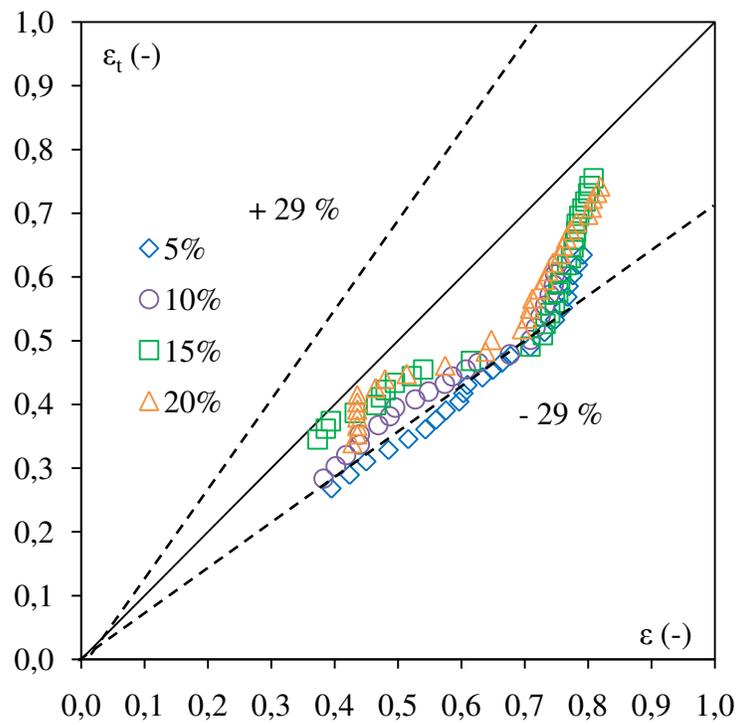


(a) Mistura eucalipto/inerte

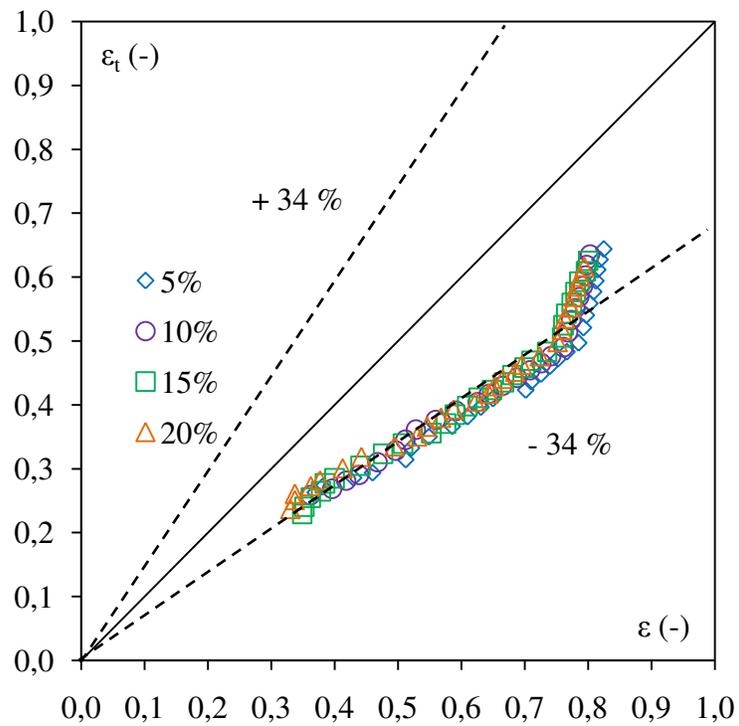


(b) Mistura tucumã/inerte

Figura 4.39 Comparativo de dados experimentais e teóricos pela equação de Tannous *et al.* (1994) aplicada a misturas biomassa/inerte ($D = 3$)



(a) Mistura eucalipto/inerte



(b) Mistura tucumã/inerte

Figura 4.40 Comparativo de dados experimentais e teóricos pela equação de Tannous *et al.* (1994) aplicada a misturas biomassa/inerte ($D = 6$)

4.9 Caracterizações Complementares

4.9.1 Caracterização química das biomassas

4.9.1.1 Análise elementar

Os resultados obtidos da análise elementar (item 3.7.1) estão apresentados na Tabela 4.7, referentes ao menor diâmetro médio de partícula (aprox. 500 μ m). A escolha deste diâmetro está associada à operacionalidade do equipamento, limitando sua utilização para materiais com baixa granulometria.

Tabela 4.7 Resultados da análise elementar para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã (b.s.)

Biomassa	\bar{d}_p (μ m)	Análise elementar (%)					
		C	H	N	TS	O ¹	TCZ ²
Eucalipto	508,73	45,48 \pm 0,16	6,33 \pm 0,23	0,04 \pm 0,01	< 0,1	48,05	0,2 \pm 0,00
Caroço do fruto do tucumã	502,47	47,99 \pm 0,63	5,99 \pm 0,18	0,29 \pm 0,11	< 0,1	44,23	1,50 \pm 0,01

¹Obtido por diferença; ²Determinado por análise imediata (item 4.10.2)

Segundo Basu (2010), os teores de cinzas obtidos pela análise imediata (item 4.10.2) podem ser usados como referência para a análise elementar. No entanto, de acordo com Sánchez (2010), na análise elementar permanece um resíduo, considerado primeiramente como cinzas, a qual raramente iguala-se à concentração deste teor da análise imediata, devido à diferença entre as técnicas. Apesar disso, neste trabalho será considerado o teor de cinzas da análise imediata igual ao da análise elementar, a fim de estimar o teor de oxigênio e, conseqüentemente, o poder calorífico inferior das biomassas (item 4.10.3). O erro atribuído a esta suposição é pequeno, devido aos baixos teores de cinza encontrados (< 1,5 %), conforme Tabela 4.7

Na Tabela 4.8 estão apresentados alguns valores da análise elementar encontrados na literatura que podem servir de comparativo, em ordem de grandeza, às biomassas utilizadas neste trabalho. Verifica-se que os resultados obtidos (Tabela 4.7) estão de acordo com a distribuição percentual dos elementos da literatura (Tabela 4.8), com elevados teores de carbono e oxigênio, e menores teores de hidrogênio, nitrogênio e enxofre.

Tabela 4.8 Análise elementar de diversas biomassas estudadas na literatura (base seca)

Material	C (%)	H(%)	N (%)	O (%)	TS (%)	TCZ (%)
Serragem de <i>Eucalyptus grandis</i> ¹	48,9	5,8	0,3	43,3	0,1	1,6
Madeira de Abeto ²	51,9	6,1	0,3	40,9	-	-
Madeira de Faia ²	49,5	6,2	0,4	41,2	-	-
Casca de avelã ²	51,6	6,2	1,6	40,2	-	-
Caroço do fruto de tucumã e amêndoa ³	58,40	4,98	1,16	35,48	-	-

¹Jenkins (1990, *apud* Sánchez, 2010); ²Demirbas (2001, 2002); ³Lira (2012)

Comparando os dados obtidos para o eucalipto com os obtidos por Jenkins (1990, *apud* SÁNCHEZ, 2010), os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio, apresentam uma diferença de no máximo 10 %, enquanto que os dados encontrados para o nitrogênio são cerca de 7 vezes maiores em comparação ao encontrado neste trabalho. Como discutido por Montão *et al.* (2012), a qualidade e as propriedades das biomassas diferem de acordo com a espécie, maturidade, e práticas de cultivo a que são submetidas, como a aplicação de fertilizantes. Estes fatores também podem estar influenciando as diferenças encontradas.

Em comparação ao caroço do tucumã, tem-se o trabalho de Lira (2012), que estudou o caroço com a amêndoa, obtendo uma diferença significativa entre os teores de carbono (+ 14 %), hidrogênio (- 28 %) e nitrogênio (+ 375 %). Isto implicou na diferença entre os teores de oxigênio, sendo esta de - 33 %. Ressalta-se que esta diferença expressiva para as variáveis determinadas deve-se a comparação dos dados do caroço do tucumã para este trabalho, com os dados da mistura do caroço com a amêndoa, para o trabalho de Lira (2012).

4.9.1.2 Composição química

Os dados experimentais obtidos da análise da composição química estão apresentados na Tabela 4.9.

De acordo com Lee *et al.* (2007), materiais lignocelulósicos, como palha de trigo, palha de milho e *Switchgrass*, apresentam em sua composição cerca de 30 % a 50% de celulose, 20 % a

40 % de hemicelulose e de 15 % a 25 % de lignina. Outros componentes como sais e minerais, podem compor de 5 % a 35 % da estrutura dessas plantas.

Resgatando o trabalho de Demirbas (2001), alguns exemplos são apresentados na Tabela 4.10, onde são avaliados os teores de hemicelulose, celulose e lignina das biomassas: madeira de abeto e faia, e casca de avelã. Assim como no presente trabalho, o autor encontrou teores maiores de lignina do que os definidos por Lee *et al* (2007), enquanto o restante dos dados estão de acordo com as faixas estabelecidas.

Comparando estes dados com os obtidos neste trabalho, diferenças significativas são observadas com relação aos obtidos pelos autores acima. Uma explicação a ser dada é com relação às metodologias as quais os autores se basearam para a quantificação das composições. Para o nosso caso, como foi descrito no item 3.7.2, estes elementos foram mensurados mediante uma única curva de calibração onde a referência foi à glicose (padrão), conduzindo a valores superiores a 100% (eucalipto).

As normas utilizadas por Demirbas (2001) foram a ASTM D 1103 – 60 (*Method of Test for Alpha-Cellulose in Wood*) e a norma ASTM D 1104-56 (*Method of Test for Holocellulose in Wood*), ambas citadas como retidas no site da ASTM, sem substituição.

Um estudo mais minucioso e analítico deverá ser feito para verificar as particularidades de cada biomassa e a escolha de métodos mais adequados a fim de quantificar a composição química com maior precisão.

Tabela 4.9 Composição química da parede celular das biomassas estudadas

Biomassa	Pectina (%)	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)
Tucumã	0,19±0,01	3,07±1,11	40,89±4,95	37,14
Eucalipto	0,13±0,01	6,26±0,36	71,12±0,24	37,37

Tabela 4.10 Composição química da parede celular de biomassas encontradas na literatura

Biomassa	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Final (%)
Madeira de abeto	21,31	47,11	31,58	100
Madeira de Faia	31,86	46,27	21,87	100
Casca de avelã	30,29	26,70	43,01	100

Demirbas (2001)

4.10 Caracterização térmica das biomassas

4.10.1 Análise da decomposição termogravimétrica

A análise da decomposição termogravimétrica das biomassas foi realizada para determinação das regiões de degradação dos principais constituintes da parede celular da biomassa, sendo estas: hemicelulose, celulose e lignina. Na Figura 4.41 apresentam-se as curvas de decomposição mássica das biomassas obtidas por TGA e suas respectivas derivativas.

Yao *et al.* (2008), analisaram diversas biomassas, como bambu, casca de arroz e madeiras, através de curvas termogravimétricas derivadas. Foram utilizadas massas de biomassa entre 8 mg e 10 mg, com diâmetro de partícula entre 20 mesh e 28 mesh. Os experimentos foram conduzidos em atmosfera inerte, com taxa de aquecimento de 2°C/min, usando uma vazão de nitrogênio de 60 ml/min. De acordo com os autores, o primeiro pico característico das curvas de DTG obtidas indica a decomposição térmica da hemicelulose, e o segundo pico é atribuído à decomposição da celulose. A degradação da lignina ocorre a elevadas temperaturas, podendo ser identificada pela presença de “caldas” nos gráficos.

Seguindo a metodologia de Yao *et al.* (2008), na Figura 4.41 são indicados os picos característicos para o eucalipto e o tucumã. Para a hemicelulose, o pico foi definido à temperatura de 310°C e 320°C, para o tucumã e o eucalipto, respectivamente. Para o caso da celulose, o pico característico ocorreu em 375°C para o tucumã e 380°C para o eucalipto.

Guimarães *et al.* (2009) analisou a degradação térmica da casca de banana, fibra de cana e bucha vegetal. De acordo com suas observações, definiu que a região delimitada pela temperatura de 100°C correspondia à perda de massa relativa à umidade. Entre 100°C e 200°C para a banana, e entre 100°C a 250°C para o bagaço de cana e a bucha vegetal, o autor define uma região de estabilidade térmica e entre 300°C e 400°C, a perda pode ser atribuída a hemicelulose e a celulose. Acima desta temperatura, ocorre a degradação da lignina.

Para o presente estudo, definiram-se três faixas distintas de temperatura, cujos dados estão apresentados na Tabela 4.11. Entre 25°C e 150°C, a perda de massa foi atribuída à umidade dos materiais. Entre 150 e 420°C, a perda de massa deve-se à degradação da celulose e hemicelulose e entre 420°C e 900°C, atribui-se a perda de massa relativa à degradação de lignina.

As temperaturas (T) *onset* e *endset* indicam a temperatura inicial e final de degradação de cada evento acima descrito. Na Tabela 4.11, T máx representa temperatura na máxima taxa de perda de massa para a região, e Δm a variação mássica respectiva. Para as duas biomassas,

verifica-se que a maior perda de massa ocorre para a degradação da celulose e hemicelulose, de 70 % e 52 %, para o eucalipto e o tucumã, respectivamente.

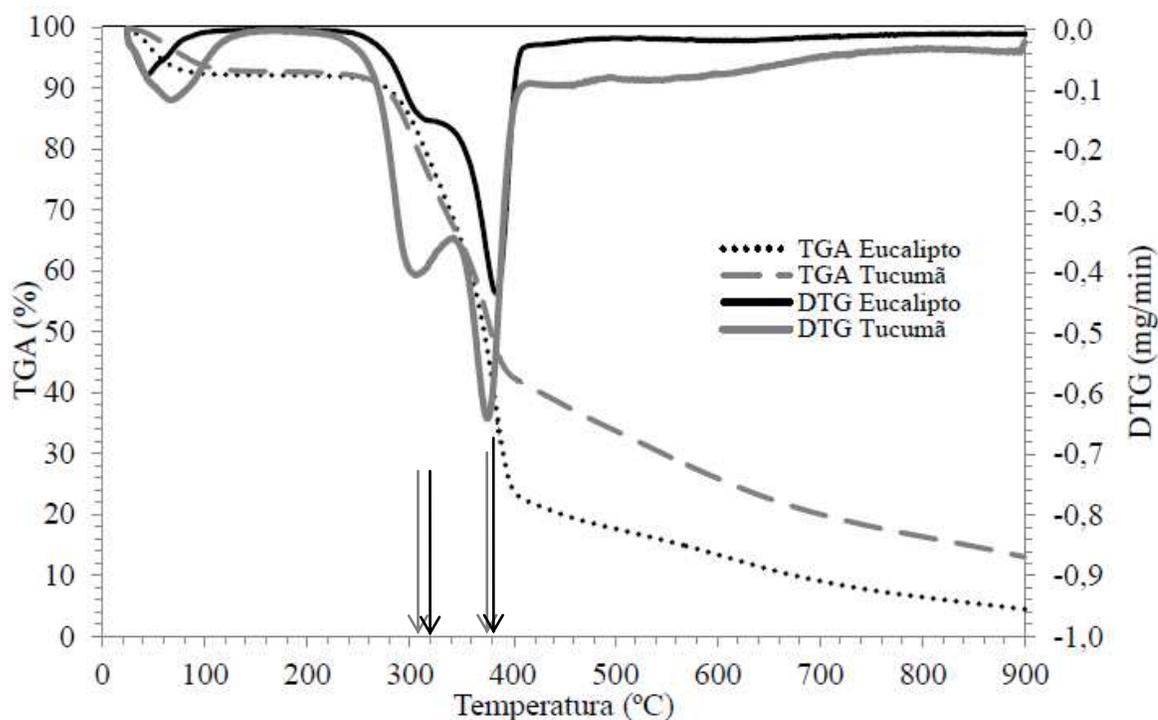


Figura 4.41 Curva de decomposição termogravimétrica para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã

Tabela 4.11 Zonas e temperaturas associadas à degradação das biomassas

Biomassa	Zonas	25 -150°C (%)	150 – 420°C (%)	420 – 900°C (%)
		(Umidade)	(Hemicelulose e celulose)	(Lignina)
Eucalipto	T onset	30,04	328,93	421,82
	T endset	68,39	398,09	693,51
	Tmax	43,63	383,48	524,22
	Δm	7,74	70,458	18,20
Tucumã	T onset	37,26	302,15	430,94
	T endset	101,27	391,85	628,57
	T max	66,46	375,33	453,67
	Δm	7,24	52,27	26,50

4.10.2 Análise imediata

Os resultados da análise imediata para as biomassas estão apresentados na Tabela 4.12. Os teores de material volátil (TMV), cinzas (TCZ) e carbono fixo (TC) estão apresentados em base seca. Observa-se que há um baixo teor de cinzas (< 1,5%), alto teor de materiais voláteis (> 77 %) e carbono fixo (> 12,8%). Para o eucalipto, o teor de voláteis apresentado refere-se à norma NBR 8112 (1986), pois através de diversos experimentos com a norma ASTM E872 o teor de voláteis ficou muito acima do esperado ($91,21 \pm 0,003\%$). Comparativamente, na Tabela 4.13 estão apresentados alguns dados da literatura para estas propriedades.

Tabela 4.12 Resultados da análise imediata para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã

Biomassa	\bar{d}_p (μm)	TU (%)	Análise imediata (b.s)		
			TMV (%)	TCZ (%)	TC (%)
Eucalipto	508,73	$5,76 \pm 0,01$	$87,02 \pm 0,00$	$0,2 \pm 0,00$	$12,80 \pm 0,00$
Caroço do fruto do tucumã	502,47	$6,80 \pm 0,00$	$76,75 \pm 0,02$	$1,50 \pm 0,01$	$21,75 \pm 0,01$

Tabela 4.13 Análise imediata e poder calorífico de biomassas da literatura (base seca)

Material	TMV (%)	TC (%)	TCZ (%)	PCS (MJ/kg)
Serragem de <i>Eucalyptus grandis</i> ¹	84,20	15,2	0,60	18,00
Madeira de Abeto ²	70,70	28,5	0,81	19,77
Madeira de Faia ²	24,80	74,40	0,82	19,23
Casca de avelã ²	28,30	70,30	1,36	20,05
Casca de arroz ³	68,74	15,03	16,32	15,24
Caixeta ³	85,03	14,69	0,28	19,00
Jequitibá rosa ³	84,12	15,35	0,53	19,24
Fibra de coco ³	77,13	20,48	2,39	17,85
Ouriço de castanha do brasil ³	83,01	16,66	0,33	18,87
Caroço de tucumã misturado à amêndoa ⁴	76,37	20,56	3,06	21,08

Fonte: ¹Sánchez (2010); ²Demirbas (2001, 2002); Farias (2012)³, ⁴Lira (2012)

De forma geral, observa-se que a ordem de grandeza dos valores da análise imediata estão de acordo com a literatura destinada a biomassas (DEMIRBAS, 2001, 2002; SÁNCHEZ, 2010; LIRA, 2012).

Para Sánchez (2010), os dados para a serragem de eucalipto estão de acordo com os dados obtidos neste estudo, com diferença de 3,35 % e 18,75 % entre os teores de materiais voláteis e carbono fixo, respectivamente. Para o teor de cinzas, a diferença é mais expressiva, sendo que para o autor este foi três vezes maior. Ressalta que os teores de cinzas estão abaixo de 1 %.

Comparativo ao tucumã (LIRA, 2012), a diferença mais pronunciada também foi na comparação do teor de cinzas, sendo duas vezes maior para o autor do que o encontrado neste estudo. Para voláteis e carbono fixo, no entanto, a diferença é muito baixa, de 1,30 % para o teor de voláteis e de 5,79 % para o teor de carbono fixo.

4.10.3 Poder calorífico

Os dados relativos ao poder calorífico superior (Tabela 4.14) foram obtidos experimentalmente, por bomba calorimétrica, e a partir da Equação 3.23, de Tillman (1978), a qual considera o teor de carbono (C) da análise elementar. Observa-se uma boa concordância entre os dados de PCS experimentais e teóricos, com valores aproximados de 20 MJ/kg. De acordo com Demirbas (2004), o poder calorífico superior de biomassas, em geral, deve estar na faixa de 14 MJ/kg a 21 MJ/kg.

Comparativo a este trabalho encontra-se a pesquisa desenvolvida por Sánchez (2010) para a serragem de Eucalipto (Tabela 4.13), onde o PCS foi determinado por bomba calorimétrica. Observa-se que os valores do autor são cerca de 10% inferiores aos dados do presente trabalho.

Para o tucumã, o PCS encontrado neste trabalho é equivalente ao trabalho de Lira (2012), com uma diferença de 3,7 %. Ressalta-se que a biomassa utilizada por este autor mantém a parte oleaginosa (amêndoa) do fruto.

Em comparação ao poder calorífico superior, o poder calorífico inferior é 8,35 % menor para o eucalipto e 6,78 % menor para o tucumã, o que está de acordo com Nogueira e Lora (2003), que definem que o PCS é cerca de 10 % a 20 % maior que o PCI.

Tabela 4.14 Poder calorífico superior e inferior das biomassas (base seca)

Biomassa	\bar{d}_p (μm)	PCS (MJ/kg)		PCI (MJ/kg)
		Experimental	Tillman (1978)	Mendelev (1949)
Eucalipto	508,73	19,76 \pm 0,08	19,58	18,11
Caroço do fruto do tucumã	502,47	20,33 \pm 0,42	20,68	18,95

CONCLUSÃO

A partir dos resultados deste trabalho, puderam ser obtidas as seguintes conclusões referentes às propriedades físicas e fluidodinâmicas das misturas de biomassa (eucalipto e caroço do fruto do tucumã) e inerte (areia), bem como às propriedades químicas e térmicas das biomassas:

Caracterização física

a) O software APOGEO mostrou-se como uma alternativa prática e confiável para a determinação da esfericidade das partículas de biomassas e inerte. Comparando os dados obtidos pelo software com aqueles determinados por medições diretas (paquímetro) para as partículas de eucalipto, os ajustes foram bastante satisfatórios, com erros entre 3 % e 23 %, a depender das equações da literatura utilizadas para o cálculo da esfericidade (WADELL, 1935; RILEY, 1941; CURRAY, 1951; MASSARANI; PEÇANHA, 1986) e da faixa de diâmetros utilizada, neste estudo variada de 508,73 μm a 1993,71 μm .

b) Com relação à diferença entre as metodologias aplicadas para a determinação da esfericidade, observa-se que para as partículas de eucalipto houve uma concordância maior entre os métodos de Wadell (1935) e Riley (1941), com uma diferença máxima de 25 %, relativas às maiores partículas. Além disso, verificou-se que quando a terceira dimensão (c) foi considerada, nos métodos de Wadell (1935) e Curray(1951), a esfericidade aumentou significativamente, portanto esta dimensão deve ser considerada. Comparando os dois métodos, em relação às formas observadas para as partículas, os resultados foram mais coerentes pelo método de Wadell (1935). Para o caroço do fruto do tucumã a proposta de Riley (1941) foi utilizada, por apresentar valores de esfericidade mais elevados do que os determinados pela proposta de Massarani e Peçanha (1986), em concordância com a forma mais arredondada destas partículas. A mesma justificativa se aplica às partículas de areia.

c) A madeira de eucalipto apresentou elevada porosidade, o que foi comprovado por imagens de microscopia eletrônica de varredura e microscópio de luz. Esta característica faz com que o material apresentasse baixa massa específica aparente, e separe-se facilmente do inerte em processos fluidodinâmicos. O caroço do fruto de tucumã apresentou baixa porosidade e elevada massa específica aparente, o que beneficiou sua mistura com o inerte.

Análise fluidodinâmica

d) Os métodos de queda de pressão e desvio padrão das flutuações de pressão foram utilizados para a determinação das velocidades características, com desvio padrão máximo entre os métodos de 0,05, de forma que os valores finais foram definidos como a média destes.

e) Quatro estados fluidodinâmicos e quatro velocidades características foram definidas para as misturas biomassa/inerte, sendo estes: leito fixo ($U < U_{fi}$), segregação total ($U_{fi} < U < U_s$), segregação parcial ($U_s < U < U_{fc}$) e fluidização completa ($U > U_{fc}$). A velocidade de fluidização aparente foi definida dentro do estado segregado. Estas definições melhor se aplicaram às misturas eucalipto/inerte, devido à maior diferença entre as massas específicas e esfericidades desta biomassa em relação ao inerte, tornando mais evidentes os estados de mistura e segregação no leito. Para as misturas tucumã/inerte, a segregação foi evidenciada por uma pequena camada de biomassa suspensa na superfície do leito, apresentando, portanto, maior homogeneidade;

f) O aumento da razão de diâmetro entre biomassa e inerte (1,5 - 6), bem como a razão de fração mássica de biomassa nas misturas (5 % a 20%), aumentaram as velocidades e porosidades características de fluidização, sendo os casos mais diferenciados para o maior razão de diâmetro e fração de eucalipto ($\bar{d}_p = 1993,71 \mu\text{m}$, $\chi = 20\%$). Isto pode ser atribuído ao aumento do peso e do volume do leito nestas condições, elevando a porosidade do leito, devido ao aumento da quantidade de pistões de gás e das velocidades requeridas para a sustentação do leito. As misturas tucumã/inerte apresentaram elevado borbulhamento, o que beneficiou a qualidade das misturas.

g) A expansão dos leitos para as misturas eucalipto/inerte foram maiores para as menores razões de frações mássicas e diâmetros médios, devido à facilidade de fluidizar o leito constituído por tais partículas leves. Para a mistura tucumã/inerte, estes parâmetros praticamente não influenciaram a expansão, pois as partículas de inerte predominaram na mistura e fizeram com que a biomassa se mantivesse suspensa, sem alterar o leito como um todo.

h) Equações foram propostas para a determinação do número de Reynolds na fluidização aparente e completa (Re_{fa} e Re_{fc} , respectivamente), com os menores erros encontrados pela equação de Ergun (1952), para Re_{fa} , e pela equação de ajuste em série de potência para Re_{fc} , conforme:

Equação desenvolvida a partir da equação de Ergun (1952):

$$Re_{fa} = [32,9^2 + 0,0402Ar_m]^{1/2} - 32,9 \quad \text{ERMA(\%): 25 \% (este trabalho) e 39 \% (literatura)}$$

Equação elaborada a partir do ajuste em série de potência:

$$Re_{fc} = 0,0123Ar_m^{0,8086} \quad \text{ERMA(\%): 44 \% (este trabalho) e 29 \% (literatura)}$$

i) Critérios para a identificação de regiões de misturas foram estabelecidos, considerando dados deste trabalho e literatura, através dos adimensionais números de Reynolds e de Arquimedes: número de Reynolds na fluidização aparente ($1 < Re_{fa} < 20$) e completa ($1 < Re_{fc} < 37$), em função do Número de Arquimedes, de $200 < Ar_m < 12500$, respectivamente. O fator determinante para definição destas regiões foi o inerte, já que este representou no mínimo 80% da fração mássica das misturas utilizadas.

Caracterização química

- j) Através da análise elementar, verificou-se que o carbono e o oxigênio representaram a maior parte da composição das biomassas (94 % para o eucalipto e 92 % para o tucumã);
- k) Os ensaios para a determinação da composição química foram satisfatórios na determinação dos teores de lignina, a qual compõe 37 % da parede celular do eucalipto e do caroço do fruto do tucumã. O teor de celulose encontrado para o eucalipto (40,89 %) está próximo ao encontrado para as madeiras estudadas por Demirbas (2001), que definiu teores em torno de 47 %, bem como está dentro da faixa definida por Lee *et al.* (2007), de 30 % a 50 % para materiais lignocelulósicos. Para o tucumã, no entanto, o teor de celulose (71,17 %) está muito acima destes valores. Os teores de hemicelulose para ambas as biomassas (abaixo de 7%) também não condizem com a literatura consultada (de 21,31 % a 31,86 %, de acordo com Demirbas, 2001 e de 20 % a 40 % de acordo com Lee *et al.*, 2007).

Caracterização térmica

- l) A partir da análise da decomposição termogravimétrica das biomassas, foram definidas faixas de temperatura relativas a diferentes eventos: entre 25°C e 150°C, atribuída à perda de

umidade, entre 150°C e 420°C, devida à degradação da celulose e hemicelulose e entre 420°C e 900°C, relativa à degradação de lignina. Verificou-se que a maior perda de massa ocorreu para a degradação da celulose e hemicelulose, de 70 % e 52 %, para o eucalipto e caroço do fruto do tucumã, respectivamente;

m) Pela análise imediata os teores de material volátil e carbono fixo são os componentes majoritários da composição das biomassas, representando 99,8 % da composição do eucalipto e 98,5 % da composição do caroço do fruto do tucumã (em base seca).

n) Os métodos de bomba calorimétrica e a equação teórica de Tillman (1978) propostos para a determinação do poder calorífico superior das biomassas apresentaram diferenças pouco significativas (~2%). Além disso, apresentaram valores para o eucalipto (20 MJ/kg) e para o caroço do fruto do tucumã (21 MJ/kg) dentro da faixa estabelecida por Demirbas (2004) para biomassas, de 14 MJ/kg a 21 MJ/kg. Sendo assim, conclui-se que os métodos são igualmente confiáveis para esta determinação, fornecendo valores de acordo com faixas estabelecidas para biomassas. O poder calorífico inferior, determinado pela Equação de Mendeleev (1949) está de acordo com a teoria de Nogueira e Lora (2003).

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliando os resultados encontrados para este trabalho, sugere-se:

1. A realização de estudos de mistura e segregação de leitos fluidizados contendo misturas de biomassas e inerte, a fim de quantificar a distribuição da biomassa no leito e encontrar condições que proporcionem características homogêneas. Estas características serão de fundamental importância em processos reais, onde tais condições irão assegurar que haja transferência de calor e permitam a eficiência de equipamentos que utilizem as tecnologias de leito fluidizado, como combustores e gaseificadores, por exemplo;
2. Ampliação de escala no leito e aplicação das mesmas misturas a fim de verificar o comportamento do leito e seus limites de mistura;
3. Utilização das misturas estudadas neste trabalho em reatores termoquímicos a fim de avaliar os produtos finais nestes processos;
4. Propostas de novas equações empíricas para a determinação teórica dos parâmetros fluidodinâmicos. Para isso, sugere-se que novas variáveis sejam consideradas, como a esfericidade das partículas;
5. Métodos mais simples e específicos para a determinação da composição química das biomassas devem ser utilizados, de forma a obter resultados mais coerentes com relação à literatura disponível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. Z.; HUSSAIN, Z.; YIN PONG, S.L. Analyses of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. **Biomass and Energy**, v. 24, p. 487-494, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8112. **Carvão vegetal – Análise Imediata**. Out. 1986.

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF ano base 2009**. Brasília: Editora Gráfica Semear, 140 p., 2010.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – Biomassa. In. ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acessado em: 22 maio 2011.

APPEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. Anatomia Vegetal. Viçosa, MG: UFV, 2. ed 438 p., 2006.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standart D 1103 – 60, 1977. **Method of Test for Alpha-Cellulose in Wood**.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standart D1104-56, 1978. **Method of Test for Holocellulose in Wood**.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standart D240, 2009. **Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter**.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standart E 1755-01, 2007. **Standard Test Method for Ash in Biomass**.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standart E871 – 82, 2006. **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standart E872 – 82, 2006. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**.

AZNAR, M.P.; GARCIA-GORRIA,F.A.; CORELLA,J. Minimum and maximum velocities for fluidization for mixtures of agricultural and forest residues with a second fluidized solid. II. Experimental results for different mixtures. **International Chemical Engineering**, v. 32, n. 1, p. 103-113, 1992b.

AZNAR, M.P.; GARCIA-GORRIA,F.A.; CORELLA,J. Minimum and maximum velocities for fluidization for mixtures of agricultural and forest residues with a second fluidized solid. I. Preliminary data and results with sand-sawdust mixtures. **International Chemical Engineering**, v. 32, n. 1, p. 95-102, 1992a.

BABU, S. P.; SHAH, B.; TALWALKAR, A. Fluidization correlations for coal gasification materials – minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio. **AIChE Symposium Series**, v. 74, n. 176, p. 176-186, 1978.

BASU, P. Biomass gasification and pyrolysis - Practical design and theory. Estados Unidos: Academic Press, 365 p., 2010.

BAUEN, A. *et al.* **Bioenergy – a sustainable and reliable energy source. A review of status and prospects.** Nova Zelândia, 108p., 2009.

BEHAINNE, J.J.R.; SÁNCHEZ, C. G. Gaseificadores. In. SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da gaseificação de biomassa. 1 Ed. Campinas, SP: Editora Átomo, p. 27-45, 2010.

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

BOYES, D. C.; ZAYED, A. M. ASCENZI, R.; McCASKILL, A.J.; HOFFMAN, N. E.; DAVIS, K. R.; GORLACH, J. Growth stage-based phenotypic analysis of Arabidopsis: a model for high throughput functional genomics in plants. **The Plant Cell**, v. 13, p. 1499-1510, jul. 2001.

CHIBA, S. *et al.* The minimum fluidization velocity, bed expansion and pressure-drop profile of binary particle mixture. **Powder Technology**, 22, p. 255-269, 1979.

CLIFT, R. Hydrodynamics of bubbling fluidized beds. In. GELDART, D (Co-autor). **Gas fluidization technology.** Chichester: J. Wiley, p. 53-96, 1986.

CLIFT, R.; GRACE, J.R. Continuous bubbling and slugging. In. DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. (Co-autores). **Fluidization.** 2 ed. Londres: Academic Press, p. 73-132, 1985.

COUTO, L., MÜLLER, M. D. Florestas energéticas no Brasil. In. CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O.; LORA, E.E.S. **Biomassa para energia.** 1. Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 93-111.

CRANFIELD, R. R.; GELDART, D. Large particle fluidization. *Chemical Engineering Science*, 29, p. 935-947, 1974.

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

CURRAY, J. K. **Analysis of sphericity and roundness of quartz grains.** Tese de mestrado- Pennsylvania State University, 1951.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, 20, p. 219 – 230, 2004.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, 2002.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion & Management**, 42, 183-188, 2001.

DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Nature**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2011: Ano base 2010**. Texto composto por Roti Sans Serif. Rio de Janeiro, 2011.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chem. Eng. Progr.**, v. 48, n. 2, p. 89-94, 1952.

FARIAS, F. O. M. Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético. Tese de mestrado em Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2012.

FITZGERALD, T. J. Coarse particle systems. In. DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. (Co-autores). **Fluidization**. 2 ed. Londres: Academic Press, p. 413-434, 1985.

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

FORMISANI, B.; GIRIMONTE, R.; LONGO, T. The fluidization pattern of density-segregating two-solid beds. **ECI Conference on The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering**, 2007.

FOUST, A.S. *et al.* **Princípio das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

GELDART, D. **Gas fluidization technology**. Great Britain: John Wiley & Sons Ltd, 1986.

GELDART, D. Types of gas fluidization. Grã-Bretanha: **Powder Technology**, p. 285-292, 1973.

GÓMEZ, O. E. *et al.* Pirólise rápida de materiais lignocelulósicos para a obtenção do bioóleo. In. CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O.; LORA, E.E.S. **Biomassa para energia**. 1. Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 395-396.

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.

GRACE, J. R. Fluidized-bed hydrodynamics. In. HETSRONI, G. (Co-autor). **Handbook of multiphase systems**. 1 v., 1982.

GUIMARÃES, J. L. *et al.* Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, 30, p.407-415, 2009.

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non-spherical particles. **Powder Technology**, 58, 63 - 70, 1989

IEA – International Energy Agency. **Key world energy statistics**. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2011/key_world_energy_stats.pdf>. Acesso em: jan. 2012.

IPEF - INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. **Indicações para escolha da espécie de *Eucalyptus***. Piracicaba, SP, dez. 2005. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/eucalyptus/indicacoes.asp>>. Acesso em: 20 maio 2011.

JENKINS, B. M. Fuel properties for biomass materials. **International Symposium on Application of Energy in Agriculture: The Role of Biomass Fuels**. India: 1990.

KAMISAKA, S.; TAKEDA, S.; TAKAHASHI, K.; SHIBATA, K. Diferulic and ferulic acid in the cell wall of *Avena coleoptiles*: their relationship to mechanical properties of the cell wall. **Physiologia Plantarum**, 78, p. 1 a 7, 1990.

KRAUS, J. E.; ARDUIM, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. EDUR, Rio de Janeiro, 1997.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2 ed. Newton, MA: Butterworth – Heinemann, 1991.

LABPALM – **Laboratório de Pesquisas em Palmeiras**. Disponível em: <http://labpalm.inpa.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=4>. Acesso em: 13 fev. 2012.

LEE, D.; OWENS, V. N.; BOE, A.; JERANYAMA, P. **Composition of herbaceous biomass feedstocks**. Dakota do Sul, 2007.

LEVA, M. Fluidization. New York: McGraw-Hill, 1959.

LIRA, C. S. **Pirólise rápida da semente de tucumã-do-Amazonas (*Astrocaryum aculeatum*): caracterização da biomassa in-natura e dos produtos gerados**. Tese de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2012.

LORA, E.E.S, ZAMPIERI, M. Classificação e balanço térmico das fornalhas para combustão de biomassa. In. CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O.; LORA, E.E.S. **Biomassa para energia**. 1. Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, p. 154 - 178, 2008.

LORA, E.E.S. *et al.* Gaseificação. In. CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O.; LORA, E.E.S. **Biomassa para energia**. 1. Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, p. 241-332, 2008.

LUCAS, A.; ARNALDOS, J.; CASAL, J.; PUIGJANER, L. High temperature incipient fluidization in mono and polydisperse systems. **Chemical Engineering Communication**, 41, p. 121-132, 1986.

MANSUÊTO, L. Da mesa à produção de cosméticos e biodiesel. **Amazonas faz ciência**. Amazonas, n. 11, ano 4, p. 20 – 22, 2008.

MARANESI, L. A. H., TANNOUS, K; Real Time Interface for Fluidized Bed Reactor Simulator. **Encyclopedia of Information Science and Technology**, 2° ed.: IGI Global, 2008

MASSARANI, G.; PEÇANHA, R. P., Dimensão característica e formas de partículas, **Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos**, Campinas, p. 313-312. 1986.

MENDELEEV, D.I. *Sochineniya* (Collection of Works). Moscow: Akad. Nauk SSSR, vol. 15, 1949.

MICROMERITICS INSTRUMENTAL CORPORATION. AccuPyc™ 1130 Pycnometer: Operator's Manual, v. 2.02, 1997.

MITRI, A.G.; LOURENÇO, J.B.; TANNOUS, K. Comportamento fluidodinâmico e velocidades características de misturas binárias de biomassa (*cariniana legalis*) e areia. **XXXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. 2011.

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

NASCIMENTO, V. F.; TANNOUS, K. Estudo dos parâmetros térmico e cinético de biomassas residuais amazônicas através da análise termogravimétrica. **XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Rio de Janeiro**, 2012

NOGUEIRA, L.; LORA, E. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2003.

NREL - National Renewable Energy Laboratory. Disponível em: <http://www.nrel.gov/learning/re_biomass.html>. Acessado em: 09 abr. 2012.

OLIVEIRA, C. R.M.; TANNOUS, K. Fluidodinâmica de biomassa em leito fluidizado gasoso. **VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2009.

OTERO, A. R., CORELLA, J. Fluidizacion de mezclas de solidos de distintas características. *An R Soc Esp Fis y Quim*, 67, p. 1207–1219, 1971.

RAMAKERS, B. J.; RIDDER, R.; KERKHOF, P.J.A.M. Fluidization behavior of wood/sand mixtures. **Anais do 14º International Drying Symposium**, São Paulo, v. B, p. 1337-1344, 2004.

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

RAO, K. V. N. S., REDDY, G.V. Cold flow studies of rice husk, sawdust, and groundnut shell fuels in a fluidized bed. **Energy Source**, Parte A, 32: 1701-1711, 2010.

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

RILEY, N.A. Projection sphericity. **Journal of Sedimentary Research**, v. 11, n. 2, p. 94-95, 1941.

RIMOLI, D.; ASSIS, D. M.; TANNOUS, K., Simulator Software Applied to Fluidized Bed Reactor – SEREA. **The 5th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids**, Sorrento/Itália, 2006.

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

SÁNCHEZ, C. G. Caracterização das biomassas. In. SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da gaseificação de biomassa. 1 Ed. Campinas, SP: Editora Átomo, p. 200-209, 2010.

SANTO, E. S. **Estudo dos fenômenos de mistura e segregação em leitos fluidizados de partículas polidispersas**. Tese de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.

SILVA, F.S.; TANNOUS, K., APOGEO - **Analisador de Partículas e Formas Geométricas**, INPI - Número de protocolo: 018120004987, 23.02.2012.

TANNOUS K.; HEMATI M.; LAGUERIE C. Caractéristiques au minimum de fluidisation et expansion des couches fluidisées de particules de la catégorie D de Geldart. **Powder Technology**, v. 80, p. 55-72, 1994.

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

TANNOUS, K. **Contribution a l'étude hydrodynamique des lits fluidisés de grosses particules**. Tese de doutorado em Engenharia Química - Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Génie Chimique (ENSIGC) - IPT, França, 1993.

TANNOUS, K.; DONIDA, M. W.; OBATA, L. A. Entrainment of heterogeneous particles from gas-fluidized bed. **Particle Science and Technology**, 26: 222-234, 2008.

TANNOUS, K.; MIZONOV, V. Comportamento da biomassa na fluidodinâmica em leitos fluidizados cônico e cilíndrico. **XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Campinas – Sp. Digital. 2009.

THONGLIMP, V.; HIQUILY, N.; LAGUERIE, C. Vitesse minimale de fluidization et expansion de couches de mélanges de particules solides fluidisés par un gaz. **Powder Technology**, v. 39, p. 223-239, 1984.

TILLMAN, D.A. Wood as an energy resource. Nova York: Academic Press, 1978, 252p.

TRAZZI, G. L. M.; TANNOUS, K. Estudo fluidodinâmico de misturas binárias em leito fluidizado com planejamento experimental. **VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2009.

VALE, A. T., BARROSO, R. A., QUIRINO, W. F. Caracterização da biomassa e do carvão vegetal do coco-da-baía (*Cocos nucifera* L.) para uso energético. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 4, p. 365-370, 2004.

VALE, A.T. *et al.* Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* hill ex- maiden e *Acacia mangium willd* em diferentes níveis de adubação. Lavras, SP: **Revista Cerne**, jan./mar. 2000, vol. 6, número 001.

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

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

YANG, W.C. Bubbling fluidized beds. In. YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. Nova York: Editora Marcel Dekker, 861 p., 2003.

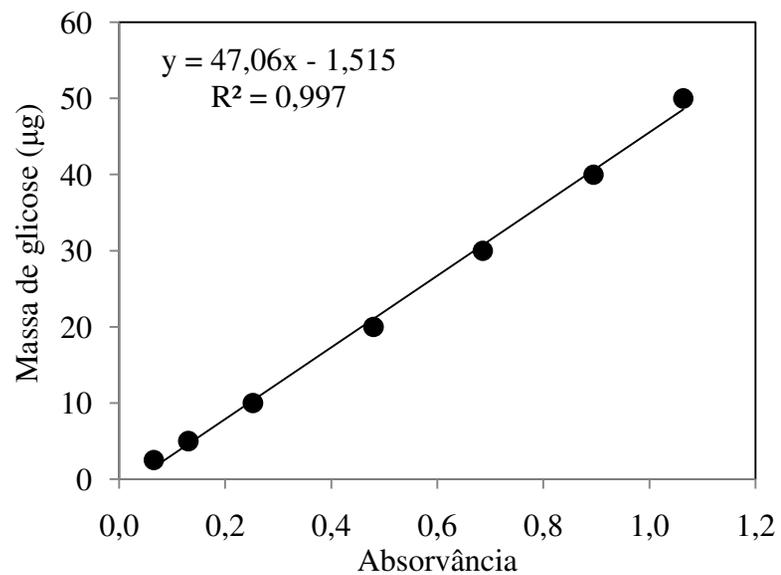
Yao, F. *et al.* Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. **Polymer Degradation and Stability**, 93, p. 90-98, 2008.

APÊNDICE A

Capítulo 3 Materiais e métodos

Apêndice com os dados utilizados de massa de glicose e absorvância para a construção da Equação 3.13 para a determinação dos teores de pectina, hemicelulose e celulose.

Volume de amostra (µl)	Absorbância				Massa de glicose (µg glicose)
	1ª repetição	2ª repetição	3ª repetição	Absorbância média	
10	0,065	0,066	0,065	0,065	2,5
20	0,128	0,138	0,125	0,130	5
40	0,246	0,253	0,258	0,252	10
80	0,493	0,463	0,483	0,480	20
120	0,689	0,681	0,687	0,686	30
160	0,894	0,894	0,896	0,895	40
200	1,064	1,063	1,065	1,064	50



Curva de calibração da concentração de glicose utilizada para determinação das concentrações de pectina, hemicelulose e celulose.

APÊNDICE B

Capítulo 4 Resultados e discussão

Apêndice com os dados da literatura para construção de correlações para velocidades de fluidização aparente e completa de misturas biomassa/inerte.

Tabela B1 Propriedades físicas e fluidodinâmicas de misturas de biomassa da literatura

Autor	Inerte	Sólidos									Parâmetros fluidodinâmicos					
		\bar{d}_p	ρ_i	$\bar{\varphi}_i$	Biomassa	\bar{d}_p	ρ_b	$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_m$	χ	U_{fi}	U_{fa}	U_{fc}	ε_{fa}	ε_{fc}	
Tannous; Mizonov (2009)	Alumina 1	125,5	3900	0,83	Casca de arroz	1436,98	989	0,24	0,535	2,56	0,14	0,025	0,132	0,78		
											5,26	0,014	0,029	0,135	0,79	
											8,11	0,014	0,028	0,145	0,79	
											11,11	0,02	0,05	0,24	0,81	
											14,29	0,028	0,07	0,36	0,84	
											2,5	0,012	0,02	0,134	0,783	
											5	0,012	0,02	0,134	0,795	
	7,5	0,012	0,02	0,145	0,798											
	10	0,02	0,09	0,245	0,838											
	15	0,04	0,135	0,45	0,867											
	2,55	0,18	0,28	0,4	0,65											
	5,21	0,25	0,4	0,68	0,73											
	7,98	0,27	0,45	0,78	0,79											
	10	0,44	0,57	1,08	0,894											
Oliveira e Tannous (2009)	Areia 1	306,93	2647	0,75		1436,98	989	0,43	0,590	2,5	0,184	0,286	0,4	0,55	0,7	
											5	0,215	0,318	0,438	0,61	0,77
											7,5	0,318	0,429	0,53	0,63	0,82
											10	0,36	0,52	0,661	0,75	0,83
											1979,5	0,47	0,235	2,5	0,092	0,16
	5	0,17	0,27	0,319	0,59	0,655										
	7,5	0,241	0,333	0,45	0,615	0,73										
	10	0,281	0,46	0,72	0,76	0,85										

Tabela B1 Propriedades físicas e fluidodinâmicas de misturas de biomassa da literatura (continuação)

Autor	Inerte	Sólidos					Parâmetros fluidodinâmicos									
		\bar{d}_p	ρ_i	$\bar{\varphi}_i$	Biomassa	\bar{d}_p	ρ_b	$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_m$	χ	U_{fi}	U_{fa}	U_{fc}	ε_{fa}	ε_{fc}	
Mitri <i>et al.</i> (2011)	Areia	336	2652	0,87	Jequitibá rosa	494	770	0,42	0,65		2,5	0,1	0,11	0,45	0,48	0,73
											5	0,11	0,17	0,45	0,55	0,73
											7,5	0,13	0,21	0,45	0,54	0,72
											10	0,17	0,25	0,45	0,53	0,73
											12,5	0,15	0,24	0,44	0,54	0,66
											15	0,13	0,17	0,44	0,55	0,68
						986					2,5	0,11	0,13	0,45	0,48	0,72
											5	0,18	0,21	0,49	0,49	0,72
											7,5	0,23	0,34	0,49	0,62	0,69
											10	0,24	0,41	0,53	0,62	0,71
											12,5	0,25	0,42	0,54	0,63	0,69
											15	0,41	0,43	0,62	0,62	0,74
						2008					2,5	0,08	0,12	0,43	0,46	0,73
											5	0,08	0,16	0,45	0,46	0,7
											7,5	0,09	0,15	0,48	0,51	0,69
											10	0,16	0,38	0,81	0,57	0,74