UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – ENGENHARIA DE PROCESSOS

CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSAS BRASILEIRAS PARA FINS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Autor: Francisco Otávio Miranda Farias Orientadora: Profa. Dra. Katia Tannous

> Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo Fevereiro de 2012

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

F225c	Farias, Francisco Otávio Miranda Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético / Francisco Otávio Miranda FariasCampinas, SP: [s.n.], 2012.
	Orientador: Katia Tannous. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.
	1. Propriedades físicas. 2. Propriedades térmicas. 3. Escoamento. 4. Energia - Fontes alternativas. I. Tannous, Katia. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Characterization of brazilian biomasses for energy recovery Palavras-chave em Inglês: Physical properties, Thermal properties, Flow, Energy - Alternative sources Área de concentração: Engenharia de Processos Titulação: Mestre em Engenharia Química Banca examinadora: Araí Augusta Bernárdez Pécora, Antônio Carlos Luz Lisboa Data da defesa: 29-02-2012 Programa de Pós Graduação: Engenharia Química Dissertação de Mestrado defendida por Francisco Otávio Miranda Farias e aprovada em 29-

02-2012 pela banca examinadora constituída pelos doutores

Prof^a. Dr^a. Katia Tannous Orientadora DRD BPRORD Prof^a. Dr^a. Araí Augusta Bernárdez Pécora Membro Titular Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisboa Membro Titular

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Francisco Otávio Miranda Farias e orientada pela Profa. Dra. Katia Tannous

annais

Assinatura do Orientador

Campinas, 29 de fevereiro de 2012

Dedico à minha família. Meus pais, irmãos, esposa e a todos aqueles que tinham certeza que eu venceria, antes mesmo que eu começasse a lutar.

<u>Amazonas</u>

Eu amo esses rios da selva Nas suas restingas meus olhos passeiam O meu sangue nasce nas tuas entranhas E nos seus mistérios meus olhos vagueiam

E das tuas águas sai meu alimento Vida, fauna, flora o meu sacramento Filho dessa terra da cor morenêz Esse sol moreno queimou minha tez

Cabocla cheirosa, caboclo guerreiro Cunhantã viçosa, curumim sapeca Eu amo essas coisas tão puras tão minhas Gostosas farinhas no caldo do peixe O banzeiro e a canção, e o farto verão Tudo isso me faz com que eu não te deixe

Amazonas, Amazonas, Amazonas meu amor...

Amazonas, Amazonas, Amazonas meu amor...

(Artista: Lucilene Castro)

AGRADEÇO:

A Deus pela vida e saúde no decorrer de toda pesquisa,

À Prof. Dra. Katia Tannous pela orientação,

Aos Profs. Drs. Araí A.B. Pécora (FEM/UNICAMP) e Antonio C.L. Lisboa (FEQ/UNICAMP), que gentilmente cederam seus laboratórios para a realização das análises térmicas,

Ao Sr. Levi Esmael Madeira, da ACEP/UNICAMP pelo suporte técnico,

Aos colegas de laboratório, para sempre bons amigos,

À minha família pelo apoio em todos os momentos,

Ao professor David Xavier, diretor do CESP/UEA, que me permitiu permanecer em Campinas

e realizar a parte experimental deste trabalho.

Aos amigos Max Adilson Lima Costa, Jackney Alfaia, Cleyson Galúcio e Nayme Castro pela companhia e amizade nos momentos bons, e principalmente nos momentos difíceis.

Novas alternativas energéticas tem sido tema de discursos sobre conservação dos recursos naturais. Tais discursos baseiam-se principalmente na redução da emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes, originados na sua maioria pelo uso de combustíveis fósseis, que ainda são a maior fonte geradora de energia da atualidade. Em vista da possibilidade de aplicação de biomassas como insumo energético, este trabalho apresenta um estudo experimental sobre potencialidade energética de seis biomassas de natureza vegetal. Além disso, foram realizados estudos sobre a escoabilidade destes materiais. As biomassas estudadas foram: casca de arroz (Oryza sativa L.), bagaço de cana (Saccharum officinarum L.), fibra de coco (Cocos nucifera), ouriço de castanha do Brasil (Bertholletia excelsa) e dois tipos de madeira: caixeta (Tabebuia cassiniodes Lam.) e jequitibá rosa (Cariniana legalis), que foram submetidos a caracterização física, térmica e de escoabilidade. As técnicas aplicadas foram: peneiramento, picnometria de gás hélio, métodos geométricos e microscopia eletrônica de varredura para a caracterização física e, as análises imediata e calorimétrica, para a caracterização térmica. As análises foram realizadas em um intervalo de granulometria previamente determinado entre as categorias B e D de Geldart. Os diâmetros médios estudados foram entre 0,5 e 3 mm, massa específica real entre 1450 kg/m³ e 1720 kg/m³, e esfericidades entre 0,42 e 0,60. A análise morfológica mostrou superfícies diferenciadas: rugosa (casca de arroz), cilíndrica (fibras de coco e bagaço de cana), elementos de vasos (madeiras), lenhosa envolvida por núcleo com pequenos poros cegos (ouriço de castanha do Brasil). A análise de escoabilidade das biomassas foi definida mediante os índices definido como razão de Hausner (RH) e compressibilidade de Carr (ICC), bem como ângulo de repouso. Os resultados mostraram escoabilidade boa ou razoável, com destaque para casca de arroz, o ouriço de castanha do Brasil e a madeira caixeta. Com isso, uma nova classificação sobre a escoabilidade foi proposta considerando os seguintes índices: classe 1 - boa (RH: 1 - 1,30; ICC: 5 - 15%; AOR:10 - 30°), classe 2- razoável (RH: 1,30 - 1,50; ICC: 15 - 25%; AOR: 30 - 45°), classe 3- baixa (RH: 1,50 - 1,80; ICC: 25 - 35%; AOR: 45 - 55°) e classe 4- difícil (RH: >1,80; ICC: >35%; AOR: >55°). Pela análise imediata foi detectado para as biomassas estudadas: alto teor de materiais voláteis (>80%), baixo teor de carbono fixo (<20%), e baixo teor de cinzas (< 16%). O poder calorífico é praticamente constante para os diâmetros considerados, tendo uma variação de 15 MJ/kg a 19 MJ/kg. De posse desses dados, conclui-se que as biomassas estudadas apresentam potencial energético favorável para aplicação como matérias-primas para geração de energia.

Palavras chaves: Propriedades físicas, Propriedades térmicas, Escoamento, Energia - Fontes alternativas

Abstract

New energetic alternatives have been the subject of discussion about conservation of natural resources. Such discourses are based mainly on reducing emissions of greenhouse gases and other pollutants, caused mostly by the use of fossil fuels, major source of energy today. In view of the applicability of biomass as energy input, this paper presents an experimental study on the potential energy of six vegetable biomasses in nature. Furthermore, studies were performed on the flowability of the foregoing. The biomasses studied were: rice husk (Oryza sativa L.), sugarcane bagasse (Saccharum officinarum L.), coconut fiber (Cocos nucifera), hedgehog Brazil nut (Bertholletia excelsa) and two types of timber, caixeta (Tabebuia cassiniodes Lam.) and jequitibá-rosa (Cariniana legalis), and, which were submitted by physical, thermal and flowability characterizations. The techniques applied were: screening, helium pycnometry, geometric methods and scanning electron microscopy for the physical characterization and immediate and calorimetric analysis for the thermal characterization. The analyses were performed in a range of particle size previous determined, between B and D categories of Geldart. The mean diameters were studied between 0.5 and 3 mm, absolute density between 1450 kg/m³ and 1720 kg/m³ and sphericity between 0.42 e 0.60. Morphological analysis showed different surfaces: rough (rice husk), cylindrical (coconut fiber and sugarcane bagasse), vessel elements (wood), woody surrounded by core with blind small pores (hedgehog Brazil nut). The flowability analysis of biomass has been defined by the index set, Hausner ratio (RH) and Carr compressibility (ICC), as well as angle of repose (AOR). The results showed that the most of the materials showed good or reasonable flowability especially rice husk, the hedgehog Brazil nut and *caixeta* timber. Thus, a new classification on the flowability was proposed considering the following indexes: Class 1 - Good (HR: 1 - 1.30; CCI: 5 - 15%; ROA:10 - 30°), Class 2 - reasonable (HR: 1.30 - 1.50; ICC: 15 - 25%; AOR: 30 - 45°), Class 3 - Low (RH: 1.50 - 1.80; ICC: 25 - 35%; AOR: 45 - 55°) and class 4 - difficult (RH: >1.80; ICC: >35%; AOR: >55°). For immediate analysis, it was detected: high content of volatile materials (> 80%), low fixed carbon content (<20%) and low ash (<16%). The calorific value is substantially constant for the diameters considered, varying from 15 MJ / kg to 19 MJ / kg. With these data, we conclude that the biomasses present energy potential favorable for application as raw materials for power generation.

Keywords: Physical properties, Thermal properties, Flow, Energy - Alternative sources

Sumário

Índice de Figuras	xiiiii
Índice de Tabelas	xviiii
Nomenclaturas	xix
Introdução	1
Objetivo Geral	2
Objetivos Específicos	2
Capítulo 1 Revisão da literatura	4
1.1. Biomassas e sua participação nas matrizes energéticas	4
1.2. Processos de conversão de biomassa em combustível	5
1.3. Caracterização física de biomassa vegetal	6
1.3.1 Tamanho e distribuição granulométrica das partículas sólidas	6
1.3.2 Esfericidade	7
1.3.3 Massa específica real e porosidade	9
1.3.4 Massa específica do leito (ρ_b)	10
1.3.5 Caracterização morfológica	11
1.4 Caracterização de escoabilidade	12
1.4.1 Razão de Hausner (RH) e Índice de compressibilidade de Carr (ICC).	13
1.4.2 Ângulo de repouso	15
1.4.3 Evolução da porosidade do leito	17
1.5 Propriedades termo-físicas de biomassa vegetal	18
1.5.1 Análise imediata	18
1.5.2 Poder calorífico	
Capítulo 2 Materiais e Métodos	22

2.1 Natureza e seleção das amostras	22
2.2 Escolha dos intervalos de caracterização	25
2.3 Processos de moagem das amostras	25
2.4 Caracterização física	27
2.4.1. Amostragem	27
2.4.2 Tamanho e distribuição granulométrica	27
2.4.3 Esfericidade	29
2.4.4 Massa específica real (ρ_p)	32
2.4.5 Massa específica do leito (ρ_b) – aerada e batida	33
2.4.6 Morfologia da amostra	34
2.5 Caracterização de escoabilidade	35
2.5.1 Razão de Hausner (RH)	35
2.5.2 Índice de compressibilidade de Carr (CCI)	35
2.5.3 Ângulo de repouso (AOR)	35
2.5.4 Evolução da porosidade do leito aerada e batida	37
2.6 Caracterização Térmica	37
2.6.1 Análise Imediata	37
2.6.2 Poder Calorífico Superior (PCS)	40
Capítulo 3Resultados e Discussão	43
3.1 Caracterizações físicas	43
3.1.1 Distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas	43
3.1.2 Esfericidade	52
3.1.3 Determinação das Massa Específica Real e do leito	55
3.1.4 Massa Específica Real (p)	55
3.1.5 Massa específica do leito (ρ_b) – aerada e batida	56

Referências	88
Conclusões	84
3.2.2 Análise do Poder Calorífico Superior (PCS)	. 82
3.3.1 Análise Imediata	. 79
3.3 Caracterização Térmica	79
3.2.4. Proposta de relação entre indicadores de escoabilidade para biomassas	. 75
3.2.3. Ângulo de repouso (AOR)	. 72
3.2.2 Porosidade do leito aerado e batido	. 70
3.2.1. Índice de Hausner (IH) e índice de compressibilidade de Carr (ICC)	. 66
3.2. Caracterização de Escoabilidade	65
3.1.6 Morfologia das amostras	. 58

Índice de Figuras

CAPÍTULO 1 Revisão bibliográfica

Figura 1.1 Matriz energética Mundial (Fonte: ANEEL, 2009)	04
Figura 1.2. Imagens de microscopia (MEV) representando as dimensões internas	
das fibras de açaí, coco e juta obtidas pela técnica de criofratura (Fonte:	
FAGURY, 2005))	12
Figura 1.3. Efeito do comprimento da partícula em relação à razão de Hausner	
(Fonte: CHEVANAN et al. 2008)	14
Figura 1.4. Medidor Mark versão 4 desenvolvido por Geldart (Po Research Ltd.)	
(Fonte: GELDART et al. 2006)	16
Figura 1.5. Porosidade do leto em relação ao tamanho das partículas (Fonte:	
LAM et al. 2008)	18

CAPÌTULO 2 Materiais e métodos

Figura 2.1. Imagens de biomassas in natura								
Figura 2.2. Imagem da fibra de coco após desfibramento								
Figura 2.3. Fruto de Castanha do Brasil (Fonte: Scientific								
American Supplement, 1887)								
Figura 2.4. Ouriço de castanha do Brasil								
Figura 2.5. Imagens dos resíduos de madeiras								
Figura 2.6. Imagem do moedor de martelo								
Figura 2.7. Vista interna e externa do moedor de facas								
Figura 2.8. Imagens das biomassas após processo de fragmentação e								
peneiramento para o maior e menor diâmetros								
Figura 2.9. Micrômetro digital utilizado na medição das partículas	29							
Figura 2.10. Posição do equipamento para determinação das massas específica								
do leito solta e batida	33							

Figura 2.11. Esquema das posições e cortes das amostras				
Figura 2.12. Aparato de escorregamento usado na determinação do ângulo de				
repouso estático	36			
Figura 2.13. Transferidor utilizado para medir o ângulo de repouso do				
material	36			
Figura 2.14. Cilindro rotativo utilizado na determinação do ângulo de repouso				
dinâmico	37			

CAPÌTULO 3 Resultados e discussão

Figura 3.1. Distribuição granulométrica da casca de arroz e diâmetro médio de	
Sauter	44
Figura 3.2. Distribuição granulométrica do bagaço de cana e diâmetro médio de	
Sauter	45
Figura 3.3. Distribuição granulométrica da fibra de coco e diâmetro médio de	
Sauter	46
Figura 3.4. Distribuição granulométrica do Ouriço de Castanha do Brasil e	
diâmetro médio de Sauter	47
Figura 3.5. Distribuição granulométrica da caixeta e diâmetro médio de	
Sauter	48
Figura 3.6. Distribuição granulométrica do jequitibá rosa e o diâmetro médio de	
Sauter	49
Figura 3.7. Esfericidade da casca de arroz em relação ao diâmetro médio para	
os quatro métodos considerados	52
Figura 3.8. Esfericidade de biomassa em função do diâmetro médio das	
partículas para os quatro métodos considerados	53
Figura 3.9. Esfericidade do ouriço de castanha em relação ao diâmetro médio	
para dois métodos	54
Figura 3.10. Esfericidade das madeiras em função do diâmetro médio de Sauter	
para os quatro métodos adotados	54
Figura 3.11. Massa específica real em função do diâmetro médio das	

partículas	55
Figura 3.12. Massas específicas do leito aerada e batida, dos materiais em	
função do diâmetro médio de Sauter	57
Figura 3.13. (a) Corte longitudinal da semente de arroz; e (b e c) Imagens de	
MEV da casca de arroz ($\bar{d}_p = 1431 \ \mu m$)	58
Figura 3.14. Imagem MEV da casca de arroz mediante processo de criofratura	
$(\bar{d}_p = 2738\mu m)$	59
Figura 3.15. Imagens MEV para bagaço de cana – corte com lâmina $\bar{d}_p = 1970$	
μm	60
Figura 3.16. Imagens MEV para bagaço de cana mediante processo de	
criofratura $\bar{d}_p = 1970 \mu m$	61
Figura 3.17. Imagens MEV fibra de coco - corte com lâmina (\bar{d}_p =	
896 μm)	61
Figura 3.18. Imagens MEV para estrutura interna da fibra de coco mediante	
processo de criofratura ($\bar{d}_p = 896 \mu m$)	62
Figura 3.19. Imagens MEV para o ouriço de castanha do Brasil (\bar{d}_p =	
496 μm)	62
Figura 3.20. Imagens MEV do ouriço de castanha do Brasil (\bar{d}_p =	
989 μm)	63
Figura 3.21. Imagens de MEV da caixeta - corte com lâmina (\bar{d}_p =	
1006µm)	64
Figura 3.22. Imagens MEV da caixeta mediante processo de criofratura (\bar{d}_p =	
1006µm)	64
Figura 3.23. Imagens MEV para jequitibá rosa - corte com lâmina (\bar{d}_p =	
501µm)	65
Figura 3.24. Imagens MEV para jequitibá rosa mediante processo de criofratura	
$(\bar{d}_p = 501 \mu m)$	65
Figura 3.25. Razão de Hausner e índice de compressibilidade de Carr em função	
do diâmetro médio de Sauter	69

Figura 5.20. Evolução da porosidade do ierto em função ao drameiro medio de	
Sauter	71
Figura 3.27. Arranjo de partículas sobre a base para o maior diâmetro de cada	
material (em torno de 2000µm)	72
Figura 3.28. Ponto de descolamento em relação à perede do cilindro rotativo	
considerado para medida de ângulo de repouso dinâmico	73
Figura 3.29. Ângulos de repouso estático e dinâmico em função do diâmetro	
médio de Sauter	74
Figura 3.30. Ângulos de repouso estático e dinâmico em função do diâmetro	
médio de Sauter	76
Figura 3.31. Relação de escoabilidade entre ângulo de repouso e razão de	
Hausner para biomassas	77
Figura 3.32. Relação de escoabilidade entre ângulo de repouso e índice de Carr	
para biomassas	77
Figura 3.33: Poder calorífico superior em função do diâmetro médio das	
partículas	82

Índice de Tabelas

CAPÍTULO 1 Revisão bibliográfica

Tabela 1.1 Esfericidade de sólidos regulares associada a formas geométricas	
(Fonte: GELDART, 1986)	08
Tabela 1.2. Massa específica do bagaço de cana para cada diâmetro médio de	
Sauter (Fonte: MATOS e TANNOUS, 2011)	09
Tabela 1.3 Classificação do índice de compressibilidade (Carr, 1965)	
escoabilidade (Hausner, 1967)	13
Tabela 1.4. Ângulo de repouso para diferentes biomassas moídas (Fonte: LAM et	
al 2008)	16
Tabela 1.5. Valores médios dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ)	
carbono fixo (CF) e de poder calorífico superior (PCS) (Fonte: Do VALE	
et al. 2002)	19
Tabela 1.6. Caracterização energética de biomassas amazônicas (Fonte: SEYE et	
al. (2008) e NOGUEIRA e RENDEIRO (2008))	20
Tabela 1.7. Comparação entre valores de PCS experimental e teórico	21

CAPÍTULO 2 Materiais e métodos

Tabela	2.1.	Método	de	equações	de	esfericidade	para	geometrias	regulares	3	
	dimer	nsões			•••••						30
Tabela	2.2.	Método	de	equações	de	esfericidade	para	geometrias	regulares	2	
	dimer	nsões		•••••		•••••	•••••		•••••		31

CAPÍTULO 3 Resultados e discussão

Tabela 3.1a. Dados experimentais das propriedades físicas das biomassas	50
Tabela 3.1b. Dados experimentais das propriedades físicas das biomassas	51
Tabela 3.2a. Dados experimentais dos índices escoabilidade das biomassas	67

Tabela 3.2b. Dados experimentais dos índices escoabilidade das biomassas	68
Tabela 3.3: Tabela dos Índices da Literatura	78
Tabela 3.4 Proposta de classificação de escoabilidade para biomassas baseado	
razão de Hausner e índice de Carr	78
Tabela 3.5a. Dados experimentais parciais da análise térmica das biomassas	80
Tabela 3.5b. Dados experimentais parciais da análise térmica das biomassas	80

Nomenclaturas

Α	Equivalente em água do calorímetro	(ml)
а	Tempo de ignição	(s)
AOR	Ângulo de repouso	(°)
b	Tempo em que a elevação de temperatura alcança 60% do total	(s)
С	Tempo em que a temperatura torna-se constante	(s)
$ar{d}_p$	Diâmetro médio de Sauter	(µm)
d_i	Diâmetro médio aritmético entre duas peneiras consecutivas	(µm)
d_{CI}	Diâmetro da circunferência inscrita	(m)
d_{CC}	Diâmetro da circunferência circunscrita	(m)
e_1	Correção para o calor de formação do ácido nítrico em calorias	cal
e_2	Correção para o poder calorífico do fio de ignição, em calorias	cal
ICC	índice de compressibilidade de Carr	(%)
m_p	Massa do sólido da partícula	(kg)
m _c	Fração mássica de carbono na biomassa combustível	(-)
M _{bio Solta}	Massa do sólido das partículas aeradas	(kg)
M _{bio batida}	Massa do sólido das partículas batidas	(kg)
m_0	Massa inicial da amostra	(kg)
m_1	Massa final da amostra	(kg)
m_2	Massa inicial de cadinho mais amostra	(kg)
m_3	Massa final do cadinho mais amostra	(kg)
m_4	Massa do cadinho vazio	(kg)
P_1	Pressão depois de pressurizar o volume de referência	(Pa)
P_2	Variação de pressão	(Pa)
r_1	Elevação da temperatura durante o período de cinco minutos antes da ignição	(s)
r ₂	Elevação da temperatura durante o período de cinco minutos após o tempo na	(s)
12	qual a temperatura permanece constante (c)	(3)
RH	Razão de Hausner	(-)
S_e	Área superficial da esfera	(m ²)
S_p	Área da superfície da partícula	(m ²)
T_a	Temperatura no momento da ignição	(° C)

T_c	Temperatura no tempo c	(° C)
Vec	Volume da esfera circunscrita	(m ³)
V _{cil}	Volume do cilindro	(m ³)
V _C	Volume da célula de amostra	(m ³)
V_P	Volume do sólido da amostra de biomassa	(m ³)
V _R	Volume de referência	(m ³)
V_s	Volume do sólido	(m ³)
Xi	Fração mássica retida na peneira de abertura	(-)

Letras Gregas

φ_{C}	Esfericidade de Curray	(-)
φ_W	Esfericidade de Wadell	(-)
φ_M	Esfericidade segundo Massarani e Peçanha	(-)
φ_R	Esfericidade de Riley	(-)
ε	Porosidade do leito	(-)
$ ho_b$	Massa específica do leito	(kg/m^3)
$ ho_{bB}$	Massa específica do leito batido	(kg/m^3)
$ ho_{bA}$	Massa específica do leito aerado	(kg/m^3)
$ ho_p$	Massa específica real	(kg/m^3)
ρ_p	Massa específica fear	(Kg/I

Introdução

Atualmente, as fontes de combustíveis fósseis mostram sinais de instabilidade deixando o sistema energético inseguro. Nesse contexto, as biomassas (recursos naturais renováveis) com potencial de geração de energia alternativa e com impacto ambiental reduzido, recebem cada vez mais incentivos e podem ter participação significativa na constituição das matrizes energéticas.

Cerca de 7% da energia consumida no mundo é originaria da aplicação de biomassa como combustível (ANEEL, 2009). Os métodos de conversão da biomassa em energia mais comumente aplicados são combustão, gaseificação, pirólise e fermentação/hidrólise para as quais deve-se verificar disponibilidade de matéria prima e mapeamento/caracterização das potencialidades das biomassas de modo a permitir sua aplicabilidade no método de conversão que melhor se adapte e se obtenha maior rendimento possível como resultado final.

Como produtores potenciais de biomassa, mencionam-se o estado do Rio Grande do Sul, grande produtor de arroz do Brasil (FEDERARROZ, 2012), região Sudeste que figura como a maior produtora nacional cana de açúcar - Safra 2008/2009 (CONAB, 2009), Nordeste que atualmente figura como maior produtor nacional de coco, panorama 2010 (MARTINS e JESUS JUNIOR, 2011), e região Norte, vista como grande produtora de madeiras, castanha do Brasil entre outras biomassas.

Uma vez verificada a potencialidade na produção de matéria prima para geração de energia (biomassa), o passo seguinte é elaborar uma proposta de caracterização que estabeleça uma relação entre biomassas de diferentes tipos e os respectivos rendimentos energéticos.

Dentre os diversos fatores que influenciam parâmetros de qualidade e valores da biomassa que têm sido usados como indicadores de eficiência e preço da biomassa constam: Poder calorífico, teor de umidade e cinzas, e ainda o tipo de biomassa e a distancia de transporte (BRAND et al. 2010).

Sabendo-se que um mapeamento de biomassas com diferentes potenciais energéticos é fundamental tanto para nortear projetos de geração de energia quanto para verificação de aplicabilidade de acordo com a região do país, este trabalho da ênfase em caracterização de biomassas dentro de um intervalo de diâmetros bem definidos.

1

Objetivos

Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo a caracterização física e térmica de biomassas vegetais brasileiras para fins de aproveitamento energético. Além disso, um estudo complementar permitirá avaliar a escoabilidade dos sólidos visando auxiliar nos processos de abastecimento dos equipamentos auxiliares de conversão, armazenamento e no transporte das biomassas.

Objetivos Específicos

Na caracterização física pretende-se:

Determinar a granulometria das partículas de biomassa através de técnicas de peneiramento, com posterior determinação do diâmetro de Sauter;

Determinar a esfericidade das partículas através de quatro correlações empíricas de determinação de esfericidade;

Medir a massa específica real através de picnômetro a gás Hélio e ainda as massas específicas do leito aerado e batido;

Fazer análise de morfologia das amostras por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na caracterização térmica pretende-se:

Realizar análise imediata das biomassas selecionadas em limites de granulometria específicos, com base em procedimento padrão;

Determinar o poder calorífico Superior (PCS) das biomassas, nos limites de granulometria específicos, em bomba calorimétrica baseando-se em procedimento padrão;

Na caracterização escoabilidade pretende-se:

Determinar os índices de compressão e escoabilidade das biomassas, observando se há diferenças significativas entre os diferentes diâmetros;

Determinar o ângulo de repouso das biomassas em relação aos diferentes diâmetros selecionados no intervalo de trabalho;

Propor uma classificação de escoabilidade de acordo com as características de cada biomassa.

Capítulo 1 Revisão da literatura

Nesta revisão bibliográfica constam publicações de trabalhos sobre a aplicação de biomassas como fonte alternativa de energia, métodos e técnicas que podem ser aplicadas efetivamente em processos de conversão. Constam ainda dados de caracterização física, térmica e de escoabilidade, que são dados inerentes ao trabalho proposto.

1.1. Biomassas e sua participação nas matrizes energéticas

O setor industrial das grandes economias mundiais, impulsionado pela ascensão dos combustíveis fósseis como fonte principal de energia, tornou a utilização da biomassa um sinônimo de subdesenvolvimento.

Atualmente, porém, a possibilidade de esgotamento das fontes fósseis, tem contribuído para a valorização de fontes renováveis (ex.: biomassas), como insumo energético importante, que poderá suprir demandas de energia térmica e de centrais elétricas de pequeno e médio porte (CORTEZ et al. 2008).

Nas Figuras 1.1a e b é possível comparar as matrizes energéticas do mundo e nacional no que se refere à utilização de energia renovável e não renovável.



Figura 1.1. Matriz energética Mundial e Nacional (Fonte: ANEEL, 2009)

As fontes renováveis totalizam hoje 15% da matriz energética do mundo com participação de fontes como biomassa tradicional e moderna, e energia hidroelétrica e outras fontes renováveis, conforme Figura 1.1.

A matriz energética nacional já apresenta percentuais superiores para o uso de biomassa moderna (22%) em relação à matriz energética mundial (2%) e energia hidroelétrica, e processos de transformação estão sendo aprimorados visando cada vez mais a sustentabilidade do sistema energético nacional.

Segundo Borges (2008), o uso de fontes renováveis para a produção de energia elétrica e térmica tem sido muito defendido como alternativa para países em desenvolvimento. Como processos de conversão podem-se citar: a combustão, pirólise, gaseificação, fermentação e hidrólise.

1.2. Processos de conversão de biomassa em combustível

Há vários processos de geração de energia que utilizam biomassa como combustível. Como exemplos desses processos estão: a combustão, que é um processo químico de oxidação de um combustível sólido (ex.: biomassa); a pirólise que é o aquecimento de biomassa em atmosfera não oxidante e que tem como resultado final material sólido rico em carbono (carvão) e uma fração de voláteis (gases/vapores orgânicos e líquidos) (LUENGO et al. 2008).

Gaseificação é o processo termoquímico de converter um insumo sólido (a biomassa) em um gás apresentando vantagens significativas sobre os demais processos de geração de energia, por que dispensa o ciclo a vapor, podendo o gás ser queimado diretamente em motor de combustão interna (LORA et al. 2008).

E para complementar, os processos de fermentação/hidrólise que é processo biológico de conversão de açúcares em etanol descrito resumidamente por Finguerut et al. (2008), na forma:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$
 (1.1)

É importante observar que a facilidade com que uma tecnologia pode ser desenvolvida eficientemente é uma das questões de maior relevância todos os processos de conversão energética da biomassa (KINTO, 2003).

É necessário definir as condições ótimas que proporcionam altos rendimentos, eficácia operacional e a eficiência do processo de conversão (GÓMEZ, 2002). Diante dos processos de conversão ligeiramente expostos, observa-se que para melhor eficiência de um processo de conversão de uma biomassa em energia, é necessário um mapeamento de potencialidade energética dessas biomassas. Este mapeamento forneceria parâmetros de comparação garantindo melhor direcionamento na aplicação das biomassas disponíveis para utilização como fonte alternativa de energia.

Para tal mapeamento é necessário caracterização das biomassas, sendo as de maior relevância as caracterizações físicas, térmicas e de modo complementar a caracterização de escoabilidade.

1.3. Caracterização física de biomassa vegetal

Dentre os parâmetros físicos da biomassa vegetal, pode-se citar: o tamanho, forma e as massas específicas real e assa específica do leito para as partículas.

1.3.1 Tamanho e distribuição granulométrica das partículas sólidas

Em se tratando de biomassa, a redução de tamanho mecânico desempenha um papel fundamental no fornecimento de matéria-prima para produção de bioenergia. Logística, tecnologia, equipamentos e viabilidade econômica das cadeias de fornecimento de matéria-prima estão profundamente relacionados com tamanho da partícula (MIAO et al. 2011).

Processos de redução de tamanho da biomassa, transporte e armazenamento representam entre 13% e 28% dos custos totais de matéria-prima do processo (KUMAR e SOKHANSANJ, 2007; CUNDIFF e GRISSO, 2008).

Diniz (2005) utilizou limites entre 0,18 mm e 0,30 mm na conversão térmica da casca de arroz, visando a produção de bio-óleo e resíduos sílico-carbonosos adsorventes e observou que o rendimento de bio-óleo não se altera em função do diâmetro das partículas, passando então a desconsiderar a variação deste parâmetro.

6

Diniz (2005) observa ainda, que se utilizado a casca inteira (0,85 mm) há uma diminuição no rendimento de bio-óleo. Esta redução foi atribuída à dificuldade na transferência de calor e menor superfície de contato devido a maior quantidade de espaços vazios entre partículas.

1.3.2 Esfericidade

A natureza das partículas leva à ocorrência de um número indefinido de formas geométricas, conduzindo a identificação de partículas mais ou menos esféricas, variando de 1 a 0, respectivamente. Encontram-se algumas equações simples de determinação de esfericidade considerando duas ou três dimensões, a saber:

Wadell (1935)

Segundo a proposta de Wadell (1935), a esfericidade de particulados sólidos pode ser calculada relacionando a área superficial da partícula em relação à área superficial da esfera, ambas consideradas como tendo o mesmo volume.

$$\varphi_W = \left[\frac{S_e}{S_p}\right]_{V_{esfera} = V_{particula}}$$
(1.2)

Riley (1941)

Pela proposta de Riley (1941), a esfericidade é medida pela raiz quadrada da razão entre o diâmetro da circunferência inscrita (d_{CI}) pelo diâmetro da circunferência circunscrita (d_{CC}).

$$\varphi_R = \sqrt{\frac{d_{CI}}{d_{CC}}} \tag{1.3}$$

Curray (1951)

Curray define a esfericidade como a raiz cúbica da razão entre o volume do sólido (V_s) e o volume da esfera circunscrita (V_{ec}):

$$\varphi_C = \left(\frac{V_s}{V_{ec}}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{1.4}$$

Massarani e Peçanha (1986)

Na proposta de Massarani e Peçanha (1986), a esfericidade é calculada como a razão entre o diâmetro da circunferência inscrita (d_{CI}) pelo diâmetro da circunferência circunscrita (d_{CC}) à partícula:

$$\varphi_M = \frac{d_{CI}}{d_{CC}} \tag{1.5}$$

Geldart (1986) apresentou dados de esfericidades de sólidos regulares através do método de Wadell (1935), e serão apresentados aqui para efeito comparativo, uma vez que as formas e proporções relativas destes materiais não podem ser associadas aos materiais (partículas de biomassa) utilizados neste trabalho.

Os valores de esfericidade obtidos por Geldart (1986) constam na Tabela 1.1, onde é possível notar a influência das proporções relativas no valor da esfericidade para sólidos regulares.

Forma	Proporções relativas	Esfericidade φ
	1:1:2	0,93
Esferóide	1:2:2	0,92
Esteroide	1:1:4	0,78
	1:4:4	0,70
	L = D	0,87
Cilíndrico	L = 4D	0.73
Cliniditea	$L = \frac{1}{4}D$	0,69
	$L = \frac{1}{2}D$	0,83
	1:1:1	0.81
	1:1:2	0,77
Paralelepípedo retangular	1:1:4	0,68
	1:4:4	0,64

Tabela 1.1 Esfericidade de sólidos regulares associada a formas geométricas

(Fonte: GELDART, 1986)

1.3.3 Massa específica real e porosidade

A massa específica e a porosidade são consideradas propriedades físicas de grande relevância na caracterização da madeira, sendo freqüentemente utilizada como índice de qualidade.

Em seu trabalho de caracterização de massa específica real, Moura e Figueiredo (2002) usaram frações de madeira provenientes de duas regiões diferentes (centro e periferia) de um clone de *E. globulus*, com 10 anos de idade, cultivado na Quinta de S. Francisco, em Eixo, Aveiro e concluíram que a massa específica é maior na periferia que no centro da árvore. Este comportamento se explica pela natureza da maturação da madeira, que se verifica da parte externa (casca) para a interna (próximo à medula).

Moura e Figueiredo (2002) embasados no trabalho de Webb e Orr (1997), afirmam que o picnômetro de gás determina o volume real de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. A preferência pelo Hélio se dá porque este gás, além de inerte, penetra facilmente nos poros (acessíveis) da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo, assim, determinar o volume do sólido com mais rigor.

Matos e Tannous (2011), em seu trabalho de caracterização e preparação do bagaço de cana, determinaram a massa específica real num intervalo de diâmetros de 501 μ m a 1970 μ m, onde observaram variações significativas entre os valores no entanto, essas variações não obedeceram a uma proporcionalidade com os diâmetros da partícula. Os autores consideraram que as variações se devem a diferenças nas estruturas físicas para cada diâmetro médio estudado. Estes dados estão apresentados como comparativos na Tabela 1.2.

$ar{d}_p \ (\mu m)$	Massa específica real (kg/m ³)
501	1462,6 ±7,1
700	$1685 \pm 10,1$
925	$1558,9 \pm 7,1$
1400	$1589,7 \pm 6,9$
1970	$1495,1 \pm 24,0$

Tabela 1.2. Massa específica real do bagaço de cana para diferentes diâmetros médios de Sauter

(Fonte: MATOS e TANNOUS, 2011)

1.3.4 Massa específica do leito (ρ_b)

A massa específica aparente é definida como sendo a massa dividida pelo volume ocupado. É também referida como a massa do sólido das partículas que pode ser acondicionada em um volume específico, dividida pelo volume do recipiente e depende da maneira como estas partículas são arranjadas, considerando-se fatores de compactação (ABDULLAH e GELDART, 1999).

Abdullah e Geldart (1999) apresentaram dois métodos básicos de avaliação da massa específica de um pó que fornecem um guia para as suas características de fluxo:

- Massa específica aerada (solta): o material é alocado em um recipiente sob a influência da gravidade. As medidas devem ser realizadas em recipiente sem agitação ou vibração, representando a menor massa específica estável (fixa).
- Massa específica batida (densa): é obtida através da utilização do recipiente contendo a amostra aerada, em que as partículas sólidas são forçadas a movimentar-se conduzindo a um empacotamento aleatório.

Utilizando biomassas, Chevanam et al. (2008) determinaram a massa específica do leito aerada e batida de biomassa triturada (*switchgrass*, palha de trigo e de milho) em moinho de facas com diferentes velocidades de rotação e diferentes taxas de alimentação e dimensões de tela de 50 mm, 25 mm, 19 mm e 12 mm. Na caracterização, as frações de massa entre 2 e 1,65 mm foram usadas.

A massa específica foi determinada em recipiente cilíndrico de alumínio com 0,149 m de diâmetro e 0,143 m de altura, preenchido em camadas com cerca de 1 cm de espessura, e o processo de compactação se fez da seguinte maneira:

O recipiente com a biomassa foi batido sobre uma plataforma de madeira 50 vezes com uma amplitude aproximada de 20 mm. A redução na altura da superfície de topo da biomassa foi medida utilizando um paquímetro (\pm 0,01 mm) em nove pontos diferentes (quatro próximos à borda do cilindro, quatro entre a borda do cilindro e o centro e um ponto central), sendo o resultado final a média entre esses nove pontos.

Como resultados de massa específica do leito aerada, o *switchgrass* apresentou maior valor variando de 41,5 a 105,2 kg/m³, seguido de palha de trigo 22,7 a 52,2 kg/m³ e palha de milho de 33,2 a 69,1 kg/m³

A massa específica do leito batida seguiu a mesma tendência da aerada sendo a maior do *switchgrass* variando de 47,1 a 136,9 kg/m³, seguido de palha de trigo 25,1 a 65,5 kg/m³ e palha de milho 37,2 a 85,6 kg/m³.

Os autores observaram que à medida que o tamanho da partícula aumentou, a massa específica do leito aerada diminuiu. E segundo ele, a mesma tendência foi observada por Mani et al. (2004), em seu estudo de moagem de palha de trigo, *switchgrass* e palha de cevada em moinho de martelo.

Para Chevanam et al. (2008), a diminuição da massa específica do leito com o aumento do diâmetro médio era esperado, pois, como o aumento do tamanho, aumentou também a quantidade de espaços entre as partículas arranjadas irregularmente. Isso leva à diminuição da massa e conseqüentemente a massa específica do leito.

1.3.5 Caracterização morfológica

Em processos de caracterização e preparação para análise de biomassa é fundamental a análise a sua microestrutura. Fagury (2005) analisou imagens de fibras de açaí, de coco e de juta mediante fratura com nitrogênio líquido na secção transversal dos materiais (Figura 1.2). O autor identificou as formas e medidas bem definidas das fibras e estruturas como o lúmen. Na Figura 1.2 apresentam-se também as dimensões das biomassas que possuem formatos fibroso (açaí e juta) e cilíndrico (fibra de coco).



- (c1) Fibra de juta
- (c2) Fibra de juta vista frontal
- (c3) Diâmetro lúmen juta

Figura 1.2. Imagens de microscopia (MEV) representando as dimensões internas das fibras de açaí, coco e juta obtidas pela técnica de criofratura (Fonte: FAGURY, 2005)

1.4 Caracterização de escoabilidade

Nas caracterizações de escoabilidade e compressibilidade, são importantes a observação de dois índices, a razão de Hausner e o índice de Carr. Estes índices ainda são pouco usados na literatura para biomassas, mas observa-se que é um bom indicador de análise em projeto de silos, de descarga, transporte, mistura e válvulas para dosagem de sólidos.

1.4.1 Razão de Hausner (RH) e Índice de compressibilidade de Carr (ICC)

O Índice de compressibilidade de Carr, proposto por Carr (1965) exprime o grau de compactação ou compressibilidade de pós-metálicos ou material granulado em forma percentual e definido pela razão entre massa específica do leito solta e aerada pela equação 1.6.

$$ICC = \left(1 - \frac{\rho_{bA}}{\rho_{bB}}\right) \times 100 \tag{1.6}$$

Por ser um índice simples de manusear, cada vez mais pesquisadores estão utilizando este índice para referenciar a escoabilidade de materiais granulares. Por isso, ICC pode ser classificado entre 5% e 23% em faixas desde excelente a escoabilidade ruim, conforme apresentado na Tabela 1.

Um índice similar, de interpretação mais simples, foi proposto por Hausner (1967). O termo refere-se à classificação da esoabilidade também através da massa específica do leito aerada e batida (densa) de três pós de cobre com tamanho de partícula semelhante, mas com formas diferentes (irregular, esférico e flocos). A razão de Hausner é escrita conforme a Equação 1.7.

$$RH = \frac{\rho_{bA}}{\rho_{bS}} \tag{1.7}$$

A razão de Hausner estabelece os limites entre 1,25, indicando boa escoabilidade e maiores que 1,5 indicando escoabilidade ruim e entre 1,25 e 1,5 exigem a adição de "aditivos" para melhorar o escoamento.

A Tabela 1.3 mostra um comparativo entre os dois índices e suas limitações.

	Carr (1965)	Hausner (1967)		
Limites	AOR	Classificação	Limites	Classificação
5 e 16%	25 a 30°	Excelente	< 1,25	Boa
18 a 21%	30 a 38°	Boa		Aditivo
23 a 35%	38 a 45°	Pobre		Aditivo
33 a 38%	45 a 55°	Muito pobre	> 1,50	Difícil

Tabela 1.3 Classificação do índice de compressibilidade de Carr e escoabilidade de Hausner

Chevanan et al. (2008) apresentaram resultados de sua análise de escoabilidade de biomassas, onde foram utilizadas: *Switchgrass (Panicum virgatum)*, palha de trigo e de milho moídos em moinho de facas. Como resultado a razão de Hausner para as três biomassas classificadas em peneiras de 12,5mm e 50 mm, variou da seguinte maneira: 1,114 a 1,321 para *switchgrass*, 1,105 a 1,309 para palha de trigo e 1,060 a 1,239 para a palha de milho.

Os autores considerando os limites da razão de Hausner para pós alimentares constataram que as biomassas estudadas não podem ser consideradas de escoabilidade boa. Além disso, recomendou-se que uma das possibilidades de melhorar a escoabilidade seria reduzir o tamanho da partícula para melhorar o deslocamento destas.

Na Figura 1.3 são apresentados os resultados obtidos por Chevanan et al., (2008) para razão de Hausner em função do comprimento médio geométrico das partículas. Observa-se que razão de Hausner diminui com o comprimento médio das partículas.



Figura 1.3. Efeito do comprimento da partícula em relação à razão de Hausner (Fonte: CHEVANAN et al. 2008)

Segundo os autores, a variação na razão de Hausner ocorreu em maior intensidade para as partículas de *switchgrass* seguido pela palha de trigo e de milho. No entanto, se olharmos os gráficos as partículas de *switchgrass* e palha de trigo seguem a mesma tendencia.

1.4.2 Ângulo de repouso

O ângulo de repouso estático foi definido por Carr (1965), para pós metálicos e seus limites variam de excelente até muito pobre, conforme apresentado na Tabela 1.3. Este índice tem sido utilizado como um indicador de escoabilidade de materiais, como por exemplo biomassa.

De Lima (2006) referencia principalmente dois tipos de medida de ângulo de repouso: ângulo de repouso estático e o dinâmico. O ângulo de repouso estático que refere-se à fricção de sólido granular entre si mesmo quando todo o material está estático em uma pilha de material armazenado e o ângulo de repouso dinâmico, para os casos em que o volume de material está em movimento em um transportador, como exemplo em processos de descarregamento.

Lam et al. (2008) determinaram o ângulo de repouso estático sem base fixa de biomassas *switchgrass*, palha de trigo e palha de milho moídos em um moinho de facas (RetschSM 100). Após a moagem, o comprimento geométrico das partículas utilizadas variou de 0,25 a 7,07 mm para todas as biomassas, com teor de umidade de 7,2 a 7,9% para palha de trigo; de 5,2 a 7,8% para *switchgrass* e de 6,7 a 8,7% para palha de milho.

O ângulo de repouso foi determinado usando um medidor modelo Mark versão 4 desenvolvido por Geldart (Po Research Ltd., teste AOR), conforme Figura 1.4. A medição da altura e do cone fomado pela deposição de material foi tomada por cinco vezes, para determinar o valor médio de ângulo de repouso.

A Tabela 1.4 mostra o resultado do ângulo de repouso para diferentes formas de partículas e diferentes forças agindo entre elas. Para os autores, a palha de trigo e de milho mostraram escoabilidade limitada para todos tamanhos (0,250mm - 0,707mm), tendo um aumento do AOR (43° a 47°) com a diminuição do tamanho de partículas. Para o caso da biomassa, *switchgrass*, os angulos aumentaram (36° a 43°) com a diminuição do tamanho das partículas, mostrando uma escoabilidade favorável. Para Lam et al. (2008), estas variações de ângulos de repouso estão relacionados com a diferença de forças de atrito/fricção entre as partículas.



Figura 1.4. Medidor Mark versão 4 desenvolvido por Geldart (Po Research Ltd.) (Fonte: GELDART et al. 2006)

Diamagaa	Comprimento	AOR actática (8)	Fluidez	
Diomassa	geométrico (mm)	AOR estatico ()		
	0,707	35,56	Escoamento livre	
Cuitabaras	0,500	38,60	Escoamento livre	
Swiichgrass	0,354	39,82	Boa escoabilidade	
	0,250	53,03	Boa escoabilidade	
	0,707	43,05	Boa escoabilidade	
Dolho do trico	0,500	45,80	Coesivo	
Pania de trigo	0,354	47,53	Coesivo	
	0,250	47,44	Coesivo	
	0,707	43,57	Boa escoabilidade	
Dalha da milha	0,500	45,40	Coesivo	
r anna de minno	0,354	45,64	Coesivo	
	0,250	46,12	Coesivo	

Tabela 1 /	Ângulo	de renouso	nara d	iferentes	hiomassas	moídas
Tabela 1.4	. Angulo	de repouso	para u	nerentes	DIOMASSAS	moluas

Fonte: LAM et al. (2008)
1.4.3 Evolução da porosidade do leito

A porosidade do leito foi determinada por Lam et al. (2008) para biomassas *Switchgrass*, palha de trigo e palha de milho, moídas em moinho de facas com tamanhos variando entre 0,25 a 0,707 mm, como análise complementar de seu estudo sobre massa específica do leito aerada e batida das biomassas.

A porosidade do leito fornece o empacotamento da biomassa dentro de um recipiente conhecido, e é obtido segundo a Equação 1.8.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \tag{1.8}$$

na qual \mathcal{E} é a porosidade do leito, ρ_b é a massa específica do leito (aerada ou batida), e ρ_p é a massa específica real da partícula.

As medidas das massas específicas do leito foram determinadas com um cilindro de volume de 0,615 litros e um funil suspenso com o diâmetro de abertura de 1,5 cm, posicionado a 20 cm acima do cilindro. Após o preenchimento, o recipiente com a amostra foi pesado obtendo assim a massa específica do leito empacotada de forma aerada. Para massa específica do leito batida, o peso do recipiente cheio foi registrado depois de cinco repetições.

No trabalho de Lam et al. (2008), a massa específica real foi determinada pela picnometria a gás de nitrogênio. A Figura 1.5 mostra que a porosidade do leito contendo palha de milho aumentaram levemente de 0,91 a 0,94 com o aumento do comprimento da partícula, enquanto que a porosidade do leito contendo partículas de palha de trigo permanecem praticamente constante em torno de 0,91. A porosidade do leito para *switchgrass* diminuiu de 0,87 a 0,82 com com o aumento dos tamanhos de partículas.



Figura 1.5. Porosidade do leto em relação ao tamanho das partículas (Fonte: LAM et al. 2008)

1.5 Propriedades termo-físicas de biomassa vegetal

1.5.1 Análise imediata

Em processos de transformação de biomassas em energia, seja por combustão, gaseificação, pirólise ou outro mecanismo de conversão, a degradação dos materiais constituintes da biomassa vegetal pode ser identificada pela relação temperatura/perda de massa.

Na análise imediata, porém o rendimento em termos térmicos deve ser satisfatório e do ponto de vista energético deve haver indicativo de aplicabilidade na geração de energia. Do Vale et al. (2002) realizaram análise imediata de carvão vegetal da madeira *Eucalyptus Grandis* em função do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis.

Para a carbonização da madeira, os autores variaram a temperatura de 300 a 1000 °C em intervalos de 100 °C e observaram que o PCS do carvão aumenta com a temperatura de carbonização, até o limite de temperatura de 700 °C. A partir dessa temperatura, o PCS começa a diminuir (de 800 a 1000 °C).

Os autores atribuem este comportamento pela constituição elementar do carvão vegetal, onde o Carbono e o Hidrogênio presentes em materiais voláteis apresentam comportamentos distintos com o aumento de temperatura. A Tabela 1.5 mostra os resultados de análise imediata e de PCS do carvão da madeira *Eucalyptus Grandis* para diferentes valores.

Tomporatura (°C)	Anális	PCS			
Temperatura (°C) <u>—</u>	MV	CZ	CF	(MJ/kg)	
300	44,83	0,34	54,84	27,85	
400	30,34	0,37	69,30	30,42	
500	22,55	0,35	77,10	31,86	
600	13,60	0,52	85,89	33,44	
700	7,23	0,53	92,25	34,13	
800	4,04	0,56	95,40	33,87	
900	3,93	0,61	95,47	33,53	
1000	3,25	0,81	95,93	33,14	

Tabela 1.5. Valores médios dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) carbono fixo (CF) e de poder calorífico superior (PCS)

(Fonte: Do VALE et al. 2002)

Os autores observaram que o PCS diminui mesmo com o aumento do teor de carbono fixo, e atribuem essa diminuição ao comportamento dos materiais voláteis, que possuem entre outros elementos o Hidrogênio que possui bom poder calorífico, mas quando é eliminado junto aos outros materiais voláteis causaria uma redução no PCS do carvão vegetal.

Nogueira e Rendeiro (2008) caracterizaram termicamente algumas biomassas da Amazônia (ex.: madeira, caroço de açaí, casca de nozes, entre outras) para fins energéticos (combustão e gaseificação). Da mesma forma, Seye et al (2008), realizaram trabalho de caracterização de 20 espécies lenhosas (madeiras) objetivando avaliar a qualidade de espécies nativas da região. Os autores aplicaram adaptações da norma ABNT NBR 8112 para determinação da análise imediata dos materiais.

Para os autores a análise imediata de todas as biomassas apresentou alto teor de material volátil, entre 70-80%, que o torna um combustível mais fácil e rapidamente consumível durante a combustão. Quanto ao teor de carbono fixo, apresentou valores entre 20-30%, implicando numa queima mais rápida e com maior formação de chama.

A Tabela 1.6 apresenta os resultados obtidos pelos dois autores contemplando propriedades físicas, análise imediata e poder calorífico superior (PCS).

	Espécie			Análise Imediata (%)				
Autores		Dimensão (mm)	$ ho_b$	Umidada	Materiais	Teor de	Carbono	PCS
			(kg/m^3)	(%hu)	Voláteis	Cinzas	Fixo	(MJ/kg)
				(%0u)	(%bs)	(%bs)	(% bs)	
	Cerdeiro		-	11,26	72,18	0,89	26,91	17,18
SEYE et al.	Jutaí - Açu	0,420 a	-	14,75	73,10	2,41	24,47	19,06
(2008)	Capitari	0,250	-	13,32	70,09	3,88	25,21	19,8
	Sucuba		-	14,68	77,16	1,53	21,3	19,31
NOCUEDA	Jatobá		200	-	79,6	0,4	20,0	19,41
e PENDEIRO	Casca de castanha	Inferior a	240	-	71,0	1,9	27,1	20,28
(2008)	Caniveteiro	19	260	-	75,9	1,7	22,8	21,10
(2000)	Fibra Coco		282	-	70,6	4,7	24,7	18,67

Tabela 1.6. Caracterização energética de biomassas amazônicas

Fonte: SEYE et al. 2008; NOGUEIRA E RENDEIRO, 2008)

1.5.2 Poder calorífico

Dados de propriedades químicas e térmicas, como composição elementar, imediata e poder calorífico, permitem quantificar a potencialidade energética do combustível (GÓMEZ, 2002).

Entre os dados térmicos mais importantes na caracterização de uma biomassa energética encontra-se o poder calorífico que representa a quantidade de energia liberada por unidade de massa. O poder calorífico é classificado como poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI).

Conceitualmente, PCS é a soma da energia liberada na forma de calor mais a energia gasta na vaporização da água, que se forma numa reação de oxidação. Este parâmetro é fundamental para projetos de equipamentos para centrais de combustão e gaseificação (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

O PCS pode ser obtido através do uso de bomba calorimétrica adiabática utilizando-se técnicas padrão ASTM D2040 – 64 (ASTM D2040 – 1964). Para uma biomassa vegetal pode ainda ser calculado através dos resultados da análise elementar através da correlação proposta por

Tillman (1991). Pela correlação o PCS pode ser determinado a partir da análise elementar que fornece a fração de carbono presente na biomassa. Esse cálculo pode ser feito a partir da equação:

$$PCS = 437,1(m_c) - 1669,4 \tag{1.9}$$

na qual m_c é a fração mássica de carbono na biomassa combustível obtida por análise elementar. O PCS é obtido em kJ/kg de biomassa seca (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

A Tabela 1.7 apresenta os valores PCS obtidos através de uma bomba calorimétrica em comparação com valores obtidos através da correlação de Tillman (1991). Para esta comparação foi utilizado o teor de carbono obtido por Cortez (2008) em sua análise elementar.

Tipos de Biomassa	(% bs) Carbono	PCS (MJ/kg)	PCS (MJ/kg)		
ripos de Biolilassa	(CORTEZ, 2008)	(CORTEZ, 2008)	(TILLMAN, 1991)		
Pinus	49,25	20,02	19,86		
Casca de arroz	40,96	16,14	16,23		
Bagaço de cana	44,80	17,33	17,91		
Casca de coco	48,23	19,04	19,41		

Tabela 1.7. Comparação entre valores de PCS experimental e teórico

Assim apresentaram-se as referências consultadas para elaboração deste trabalho, onde são descritas algumas das metodologias nas quais este será baseado. Destaca-se a dificuldade encontrada para a localização de métodos padrão e literatura voltada à aplicação e caracterização de biomassas.

Capítulo 2 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritas as biomassas utilizadas, sua procedência, as técnicas e equipamentos aplicados nas caracterizações física, térmica e de escoabilidade.

2.1 Natureza e seleção das amostras

Inicialmente foi realizado um levantamento das regiões brasileiras (Sul, Sudeste, Nordeste e Norte) com potencial para geração de resíduos em quantidade suficiente e acessível, de modo a justificar uma proposta de aplicação destes na geração de energia.

Deste levantamento foram selecionados seis biomassas: Casca de arroz (*Oryza sativa* L.), bagaço de cana (*Saccharum officinarum* L.), fibra de coco (*Cocos nucifera*), ouriço de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) e dois tipos de madeira: caixeta (*Tabebuia cassiniodes* Lam.) e jequitibá rosa (*Cariniana legalis*).

As cascas de arroz (Figura 2.1a) e o bagaço de cana (Figura 2.1b) são resíduos de processamento agroindustrial. O bagaço de cana teve procedência da usina São José S/A Açúcar e Álcool, localizada na cidade de Rio das Pedras, estado de São Paulo.



(a) Casca de arroz Figura 2.1. Imagens de biomassas *in natura*

(b) Bagaço de cana

A casca do coco verde foi coleta em áreas de lazer de Campinas/SP e sua fibra foi fornecida gentilmente pelo Laboratório de Embalagens de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos FEA/UNICAMP (Figura 2.2).



Figura 2.2. Imagem da fibra de coco após desfibramento

O ouriço da castanha do Brasil é um resíduo do fruto da castanheira e teve origem na comunidade de Vila Amazônia no município de Parintins – Baixo Amazonas. A Figura 2.3 mostra a estrutura do fruto de castanha do Brasil com as sementes no momento da colheita. As sementes são extraídas para consumo, enquanto que a parte externa que as envolve (ouriço) é descartada. Na Figura 2.4 mostram a parte interna e externa do ouriço utilizado no trabalho antes do processamento.



Figura 2.3. Fruto de Castanha do Brasil (Fonte: Scientific American Supplement, 1887)



Vista Interna Figura 2.4. Ouriço de castanha do Brasil

Vista externa

A caixeta e o jequitibá rosa são resíduos da fabricação de móveis cedidas pela marcenaria Dalben, localizada em Barão Geraldo, distrito de Campinas, São Paulo. As madeiras foram adquiridas pela marcenaria através da madeireira APLAMAD, que opera na extração de madeira em regiões do Mato Grosso e Rondônia.

Na Figura 2.5 é possível observar os resíduos na forma recebida, sendo a caixeta com característica de flocos quebradiços e de comprimentos variados (Figura 2.5a) e o jequitibá rosa em forma de lâminas alongadas e mais resistentes (Figura 2.5b).



(a) Flocos de madeira Caixeta Figura 2.5. Imagens dos resíduos de madeiras



(b) Lâminas de Jequitibá rosa

2.2 Escolha dos intervalos de caracterização

As faixas granulométricas escolhidas foram baseadas na classificação de Geldart (1986), sendo estes materiais fluidizáveis (grupo B) e jorráveis (grupo D), correspondentes aos diâmetros entre 4,94 x 10^{-4} m (494 µm) a 2,738 x 10^{-3} m (2738 µm). A base para estas escolhas foi devida sua aplicabilidade em leitos fluidizados que são utilizados para obtenção de geração de energia (GELDART, 1986).

2.3 Processos de moagem das amostras

As amostras foram preparadas conforme as características iniciais de cada biomassa. A casca de arroz foi obtida através do beneficiamento do arroz e foi caracterizada por Oliveira e Tannous (2011), enquanto que o bagaço de cana foi obtido na forma triturada e caracterizada por Matos e Tannous (2011).

A caixeta, o jequitibá rosa e o ouriço de castanha do Brasil foram moídos em um moedor tipo martelo, sendo este elétrico (Figura 2.6) da Industria Tigre S.A. (modelo CV5, Brasil) acoplado a um motor de indução de 3800 rpm, CV5 com carcaça 1.8/4T tipo K (marca *General Electric*, modelo 25.4062.405, Brasil).



(a) Vista do moedor e motor de induçãoFigura 2.6. Imagem do moedor de martelo



(b) Vista da parte interna do moedor

A parte inferior do moedor é revestida por uma tela com malha de aproximadamente $0,001798 \pm 10^{-4}$ m responsável pela retenção e separação do material no momento da moagem. Na Figura 2.6b é possível visualizar a referida tela.

Dadas as divergências estruturais (rigidez) entre os materiais, os procedimentos de moagem, das duas madeiras e do ouriço se deram de formas diferentes.

Madeiras: 0,017 kg de material foram moídos em um tempo de moagem de 10 segundos, além dos 11 segundos que as lâminas do moedor levam até parar completamente.

Ouriço de castanha do Brasil: Por se tratar de material rígido, 0,05 kg de material foram moídos e permaneceu por um tempo de 30 segundos mais os 11 segundos que as lâminas levam até parar. O tempo de residência foi aumentado para obter uma variedade granulométrica maior.

Diferente das madeiras e do ouriço de castanha, a fibra do coco por ser um material fibroso, leve e muito flexível precisou ser moído em moinho de facas.

Este procedimento foi realizado no laboratório de engenharia ambiental (LEA) da FEQ/UNICAMP, utilizando moedor de facas elétrico (Figura 2.7) acoplado a um motor de indução, de 1720 rpm, CV3 (Marca Eberle, modelo B90 L4).



(a) Vista do Moedor de facas e motor de induçãoFigura 2.7. Vista interna e externa do moedor de faca



(b) Vista das lâminas do moedor de facas

A partir do processo de moagem, foi possível obter uma variedade de tamanhos e formas, sendo então possível iniciar o processo de caracterização conforme se descreve a seguir.

2.4 Caracterização física

2.4.1. Amostragem

Para a seleção de amostras, o material foi submetido a um processo de subdivisão em 6 a 8 partes em bandejas de alumínio com dimensões internas de 0,2 x 0,3 m.

Neste processo buscou-se manter a mesma espessura de material que ficou em torno de 0,005 m e então foram extraídas 3 porções de cada bandeja. O processo foi repetido até que se obteve massa suficiente para realização dos ensaios de peneiramento considerando uma massa de 0,005 a 0,015 kg dependendo da natureza do material.

2.4.2 Tamanho e distribuição granulométrica

No processo de peneiramento utilizou-se peneiras Granutest, com malhas entre 8 e 48 na classificação Tyler ($\sqrt{2}$) submetidas a um processo de vibração (marca Produtest) com amplitude 9 por quinze minutos.

Uma balança semi-analítica digital com resolução de 10^{-6} kg (marca Gehaka, modelo BG 4000) foi utilizada para a determinação das massas das peneiras e amostras. Após o peneiramento e a distribuição granulométrica, foi realizado o cálculo do diâmetro médio de Sauter (\bar{d}_p) (SAUTER, 1928), que é a medida de diâmetro mais utilizado, principalmente quando se trata de aplicação em leito fluidizado.

Para uma distribuição discreta de partículas o cálculo é feito conforme Equação 2.1.

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_i}\right)} \tag{2.1}$$

na qual,

 x_i é a fração mássica retida na peneira de abertura *i*, e

d_i é o diâmetro médio aritmético entre duas peneiras consecutivas

Para o diâmetro médio aritmético entre peneiras determinada conforme Equação 2.2:

$$\bar{d}_i = \frac{d_{pi} + d_{pi+1}}{2} \tag{2.2}$$

na qual d_{pi} e d_{pi+1} são os diâmetros das peneiras correspondentes e subseqüentes.

Na Figura 2.8 são apresentadas imagens das biomassas após o processo de fragmentação, peneiramento e respectivos diâmetros médios de Sauter.



Casca de arroz (a) $d_p = 1023 \mu m e$

(b) $d_p 2738 \ \mu m$



(a) (b)

Fibra de coco (a) $d_p = 427 \mu m e$ $(b) d_p = 1893 \mu m$



Caixeta (a) $d_p = 500 \mu m e$ (b) $d_p = 1993 \mu m$

Bagaço de cana (a) $d_p = 501 \ \mu m e$ $(b) d_p = 1970 \mu m$



Ouriço de castanha (a) $d_p = 496 e$ $(b) d_p = 2080 \mu m$



Jequitibá rosa (a) $d_p = 494 \mu m e$ (b) $d_p = 2008 \mu m$

Figura 2.8. Imagens das biomassas após processo de fragmentação, peneiramento para o maior e menor diâmetro médio

2.4.3 Esfericidade

Para a determinação da esfericidade das biomassas foi associada diferentes geometrias (Tabela 2.1 e Tabela 2.2), sendo estas: cilindro (bagaço de cana e fibra de coco), paralelepípedo retângulo (jequitibá rosa e caixeta), esferóide prolato (casca de arroz), consideradas partículas de formato regular. O ouriço de castanha foi considerado como partículas de formato irregular.

Os cálculos de esfericidade para as partículas regulares foram realizados em três dimensões pela média de 100 unidades de cada diâmetro de material em estudo. As medidas das dimensões características de cada partícula de biomassa foram realizadas com auxilio de um micrômetro digital (Figura 2.9), com resolução de 10⁻⁶ m (marca Mytutoyo, modelo 293-821).



Figura 2.9. Micrômetro digital utilizado na medição das partículas

Para as partículas irregulares, as medidas foram feitas em duas dimensões (2D) através da captura de imagem das partículas (aprox. 300 partículas/diâmetro) em um scanner marca HP Scanjet 3800, visualizada pelo software irfanview versão 4.10, e em seguida processada por um programa elaborado no MatbLab versão 6.0 obtendo assim as dimensões da cada partícula.

A determinação das esfericidades das partículas foi realizada segundo quatro correlações empíricas. Estas equações a seguir estão apresentadas na sua forma geral, sendo ajustadas de acordo com a geometria (área e volume) associada às partículas de biomassa (Tabelas 2.1 e 2.2).

A título descritivo, a Tabela 2.1 e Tabela 2.2 mostram as equações específicas para cada biomassa/geometria adotados.

	Geometria	Autor/método	Equação
Cilíndrico	R	Waddel (1935)	$\varphi_W = \frac{S_e}{S_p} = 2\left(\frac{3}{4}r^2a\right)^{\frac{2}{3}}\frac{1}{ra+r^2}$
	<u> </u>	Curray (1942)	$\varphi_{C} = \left[\frac{V_{S}}{V_{ec}}\right]^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3}{4}r^{2}a\right)^{\frac{1}{3}}\left(r^{2} + \frac{a^{2}}{4}\right)^{-\frac{1}{2}}$
Paralelepípedo retângulo	¢ , , , , , , , , , , , , ,	Waddel (1935)	$\varphi_W = \frac{S_e}{S_p} = 2\pi \frac{\left(3\frac{abc}{4\pi}\right)^2}{ab + ac + bc}$
	←a¥	Curray (1942)	$\varphi_{C} = \left[\frac{V_{S}}{V_{ec}}\right]^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3abc}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{a^{2}+b^{2}}{4}\right)^{-\frac{1}{2}}$
Esferóide prolato		Waddel (1935)	$\varphi_W = \frac{S_e}{S_p} = \frac{2(abc)^{\frac{1}{3}}}{b^2 + 90ab}$
		Curray (1942)	$\varphi_C = \left[\frac{V_S}{V_{ec}}\right]^{\frac{1}{3}} = \frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a/2}$

Tabela 2.1. Método de equações de esfericidade para geometrias regulares 3 dimensões

Geometria		Autor/método	Equação
Cilíndrico	d _{cc} d _{ci} <u>a</u> /2	Riley (1941)	$\varphi_R = \left[\frac{d_{CI}}{d_{CC}}\right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{r}{\left[r^2 + (a/2)^2\right]^{\frac{1}{2}}}}$
		Massarani e Peçanha (1986)	$\varphi_M = \frac{d_{CI}}{d_{CC}} = \frac{r}{\left[r^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2\right]^{1/2}}$
Paralelepípedo retângulo	dee dee <u>a/2</u>	Riley (1941)	$\varphi_R = \left[\frac{d_{CI}}{d_{CC}}\right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{r}{\left[r^2 + (a/2)^2\right]^{\frac{1}{2}}}}$
		Massarani e Peçanha (1986)	$\varphi_M = \frac{d_{CI}}{d_{CC}} = \frac{r}{[r^2 + (a/2)^2]^{1/2}}$
Esferóide prolato	d _{ec} d _{ci}	Riley (1941)	$\varphi_R = \left[\frac{d_{CI}}{d_{CC}}\right]^{\frac{1}{2}}$
		Massarani e Peçanha (1986)	$\varphi_M = \frac{d_{CI}}{d_{CC}}$
Irregular		Riley (1941)	$\varphi_R = \left[\frac{d_{CI}}{d_{CC}}\right]^{\frac{1}{2}}$
		Massarani e Peçanha (1986)	$\varphi_M = \frac{d_{CI}}{d_{CC}}$

Tabela 2.2. Método de equações de esfericidade para geometrias regulares 2 dimensões

2.4.4 Massa específica real (ρ_p)

Com base no trabalho de Webb e Orr (1997), a determinação da massa específica real foi através de um picnômetro a gás de Hélio (marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1330 V2.02) realizado no Laboratório de Análise e Caracterização de Produtos e Processos (LCPP) da FEQ/UNICAMP.

O equipamento foi calibrado para realizar 10 medidas de cada amostra sendo o valor final a média entre as medidas. As condições utilizadas foram: temperatura média 24,0°C, taxa de equilíbrio de 6,89407 Pa/min e um número de 20 purgas.

O equipamento foi configurado para trabalhar com a pressão de preenchimento de 130 MPa em um recipiente com volume de $1,19 \times 10^{-5} \text{ m}^3$.

A medida é baseada na diferença de pressão entre um volume de referência e o volume da célula com amostra a partir da Equação 2.3:

$$V_p = V_c - V_R \left(\frac{P_1}{P_2} - 1\right)$$
(2.3)

na qual V_p é o volume ocupado pelo sólido, V_c é o volume da célula do equipamento e V_R o volume de referência, P_1 é a pressão após a pressurização da célula e P_2 é a variação de pressão após a conexão da célula de referência com a célula que contém a amostra.

A medida da massa específica real com a exclusão dos poros é então calculada a partir da Equação 2.4.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \tag{2.4}$$

na qual ρ_p é a massa específica real da partícula, m_p é a massa das partículas (excluindo os porosos) V_p é o volume de sólido das partículas.

2.4.5 Massa específica do leito (ρ_b) – aerada e batida

Baseado nos trabalhos de Lam et al (2008) e Santomaso et al (2003), determinou-se a massa específica do leito aerada e batida, conforme mostrado na Figura 2.10. O aparato trata-se de um cilindro de acrílico com 0,142 m de altura por 0,071 m de diâmetro. Para determinação do volume do cilindro foi calibrado com água a 25°C correspondendo a 578 x 10^{-6} m³.



Figura 2.10. Posição do equipamento para determinação das massas específica do leito aerada e batida

Para o escorregamento do material para o interior do cilindro, foi utilizado um funil de aço inoxidável acoplado a uma haste metálica e mufla de sustentação.

O cilindro foi preenchido completamente, até a formação de um cume além da borda superior, e o material excedente foi cuidadosamente removido com auxílio de um nivelador, sem exercer pressão sobre o material.

A compactação do material foi feita com intervalos de 10 batidas executadas mecanicamente sobre uma superfície rígida com altura máxima de 0,02 m de deslocamento. O material foi considerado compactado quando não houve mais alteração da massa (batimentos até 150 vezes).

Deve-se cuidar rigorosamente para que o material não sofra outro tipo de compactação a não ser aquele correspondente ao número de batidas a qual o recipiente foi submetido.

Devido à natureza mecânica do processo de compactação (batidas), o procedimento foi realizado em triplicada, sendo o valor final a média aritmética destas.

A massa específica do leito aerada foi calculada conforme a Equação 2.5:

$$\rho_{bA} = \frac{M_{bio\ Solta}}{V_{cil}} \tag{2.5}$$

na qual ρ_{bA} é a massa específica do leito aerada, $M_{bio \ Solta}$ é a massa do sólido das partículas soltas correspondente a zero batidas e V_{cil} é o volume do cilindro.

A massa específica do leito batida foi calculada de acordo com a Equação 2.6:

$$\rho_{bB} = \frac{M_{bio\ batida}}{V_{cil}} \tag{2.6}$$

na qual ρ_{bB} é a massa específica do leito batido, $M_{bio \ batida}$ é a massa do sólido das partículas batidas e V_{cil} é o volume do cilindro.

2.4.6 Morfologia da amostra

A microscopia das amostras de biomassa foi realizada no Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração LRAC da FEQ em um Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV (marca LEO, modelo LEO 440i, Inglaterra). O MEV é um equipamento capaz de produzir imagens de alta resolução de caráter virtual, pela transcodificação da energia emitida pelos elétrons.

A captura das imagens dos materiais não condutores foi possibilitada por um processo de metalização a vácuo realizada em metalizador Polaron, modelo Sprinter Coater 5C 7620. A partir de então as amostras foram acomodadas no suporte para observação e seleção das imagens a serem capturadas.

Para uma melhor observação da estrutura do material, estes foram submetidos a cortes com lâmina e fratura mediante congelamento com N_2 líquido, conforme:

Corte com lâminas: este foi realizado manualmente seguindo os cortes apresentados na Figura 2.11.com uma lâmina afiada de material de aço inoxidável.



Figura 2.11. Esquema das posições e cortes das amostras

Fraturamento com Nitrogênio líquido (N_2): o nitrogênio líquido foi colocado em cadinhos de porcelana de 2,5 x 10⁻⁵ m³, revestido com alumínio e as amostras imersas por aproximadamente 15 segundos para que ocorresse o congelamento. Em seguida as amostras foram fraturadas ao meio com auxílio de uma pinça.

2.5 Caracterização de escoabilidade

2.5.1 Razão de Hausner (RH)

A Razão de Hausner é definida como a razão entre a massa específica do leito batida (ρ_{AB}) e aerado (ρ_{AS}), sendo estas massas específicas do leito obtidas conforme descrito no item 2.4.4.

2.5.2 Índice de compressibilidade de Carr (CCI)

O índice de compressibilidade de Carr relaciona a massa específica do leito aerado e batido, obtidas como descrito no item 2.4.4.

2.5.3 Ângulo de repouso (AOR)

Neste trabalho foram consideradas duas metodologias para a determinação dos ângulos de repouso: estático com base e dinâmico usando um cilindro rotativo, sendo estes baseados nas especificações de Santomaso et al (2003) e Lam et al (2008). Triplicadas das medidas foram

consideradas para cada método. Os dispositivos abaixo utilizados foram confeccionados juntamente o apoio técnico Sr. Levi Madeira da ACEP/FEQ.

<u>Ângulo de repouso estático com base</u>: este método basea-se no escoamento por gravidade do material através de um funil (53°) com sua abertura bloqueada sobre um dispositivo cilíndrico com diâmetro definido de 0,07 m (Figura 2.12). A quantidade de material utilizada para a formação do cone de medida foi aquela necessária para o deslizamento das partículas sobre o cone de material. A medição do ângulo foi feita com auxílio de um transferidor de 180° e escala de 0,1 m em aço inoxidável, dotado de haste móvel (Figura 2.13).

Baseado em Lam et al (2008), as medições foram feitas em quatro pontos extremos da superfície circular. O valor considerado foi a média aritmética das quatro medições. A distancia entre o funil e a base foi de 2 vezes a diâmetro da base circular.



Figura 2.12. Aparato de escorregamento usado na determinação do ângulo de repouso estático



Figura 2.13. Transferidor utilizado para medir o ângulo de repouso do material

<u>Ângulo de repouso dinâmico usando um cilindro rotativo</u>: o dispositivo adotado consiste em um cilindro de 0,1 m de diâmetro e profundidade de 0,04 m e um transferidor, fixados em uma base de madeira, conforme a (Figura 2.14). As amostras foram inseridas no cilindro até a metade do compartimento (marcação indicativa). Em seguida, o cilindro foi girado manualmente por 10 vezes no sentido horário e a linha de referência mantida a 0°. Com isso, inicia-se o giro lentamente no mesmo sentido, levando assim o material até o seu escorregamento. Mede-se assim o ângulo de repouso para o primeiro escorregamento do material dentro do cilindro rotativo.



Figura 2.14. Cilindro rotativo utilizado na determinação do ângulo de repouso dinâmico

2.5.4 Evolução da porosidade do leito aerada e batida

A porosidade do leito foi calculada de acordo com a Equação 2.7 aplicando as definições apresentadas nos itens 1.5.3. Esta porosidade é definida tomando como base o trabalho de Lam et al (2008).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \tag{2.7}$$

na qual ε é a porosidade do leito, ρ_b é a massa específica do leito (aerado ou batido) e ρ_p é a massa específica real.

2.6 Caracterização Térmica

2.6.1 Análise Imediata

A análise imediata dos materiais foi realizada com base na norma ABNT NBR 8112 (1986), para carvão vegetal. Esta norma foi referenciada como ponto de partida do trabalho, pois até o momento, não se tem conhecimento de padronização ou normatização brasileira para análise imediata de biomassas.

Determinação do teor de umidade

Na determinação de umidade deve-se considerar que todos os materiais passaram por secagem natural em ambiente do laboratório LAPROM/FEQ e arredores.

A umidade residual das biomassas foi determinada em estufa (marca Quimis modelo Q314M-242). Com a estufa previamente aquecida a 105 °C, cadinhos de porcelana sem tampa de volume de 2,5 x 10^{-5} m³ foram levados ao seu interior por 10 minutos para remoção de possível umidade presente.

Esfriados os cadinhos em um dessecador por 1 hora, estes foram pesados e adicionados em cada um 10^{-3} kg de amostra moída, e com granulometria definida. A amostra foi pesada em balança de precisão (marca BEL Engineering) com resolução de 10^{-6} kg

Um (1) grama de amostra foram levadas à estufa previamente aquecida a 105°C por 2 horas. Após esse tempo, as amostras secas foram levadas ao dessecador por uma hora e então pesadas novamente para determinação da massa final.

A umidade foi então determinada através da Equação 2.8:

$$U = \frac{m_0 - m_1}{m_0} 100 \tag{2.8}$$

na qual:

U = teor de umidade base úmida (%) $m_0 =$ massa inicial da amostra (kg)

 $m_1 = massa final da amostra (kg)$

Determinação do teor de materiais voláteis

Esta análise foi feita em forno mufla com capacidade para atingir 1000 °C. Com a mufla previamente aquecida a 850°C, o cadinho de volume de 2,5 x 10^{-5} m³ com tampa, contendo um grama de amostra, foi posicionado no centro da porta aberta da mufla para pré-aquecimento por 3 minutos.

Depois, as amostras foram movidas para a parte interior da fornalha por 7 minutos, com a porta da mufla fechada. Se houver formação de faíscas partindo do interior do cadinho, o ensaio deverá ser descartado.

Após sete minutos no interior da mufla fechada, o cadinho foi retirado, resfriado em dessecador por 1 hora e pesado. O teor de materiais voláteis foi determinado através da Equação 2.9.

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} 100 \tag{2.9}$$

na qual:

MV = material volátel (base seca) (%)

 $m_2 = \text{massa inicial do cadinho e amostra (kg)}$

 $m_3 = \text{massa final do cadinho e amostra (kg)}$

m = massa da amostra (kg)

Determinação do teor de cinzas

Com um cadinho de volume de 2,5 x 10^{-5} m³ sem tampa, previamente seco e tarado, foi adicionado um grama de amostra. O cadinho com amostra foi levado à mufla previamente aquecida a 750°C por 6 horas.

Após esse tempo os cadinhos com amostras foram resfriados em um dessecador por 1 hora e sua massa determinada. O teor de cinzas foi determinado através da Equação 2.10.

$$CZ = \frac{m_3 - m_4}{m} \, 100 \tag{2.10}$$

na qual:

CZ = teor de cinzas (%) m_4 = massa do cadinho vazio (kg) m_3 = massa do cadinho e resíduo (kg) m = massa da amostra (kg)

Carbono fixo

O teor de carbono fixo (CF) foi determinado indiretamente com auxílio dos percentuais de cinzas e materiais voláteis através da Equação 2.11.

$$CF(\%) = 100 - (CZ - MV)$$
 (2.11)

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, sendo apresentado o resultado final como sua média aritmética.

2.6.2 Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido por uma bomba calorimétrica (marca Analis SA Suarlée-Belgium) à pressão constante baseando-se na norma ASTM D240 – 64, que é procedimento padrão para PCS de carvão vegetal. Esta norma foi usada como ponto de partida do trabalho devido a falta de padronização para analise de PCS de biomassa.

A determinação do PCS foi realizada no Laboratório de Sistemas Térmicos da Faculdade de Engenharia Mecânica FEM/UNICAMP.

O procedimento de determinação do PCS deu-se de acordo com o seguinte procedimento.

Usando uma balança de precisão (OHAUS - GA200), uma amostra de $1,5 \ge 10^{-3}$ kg (ou 1,5g) de biomassa foi comprimida em uma prensa de rosca, para obtenção de uma pastilha cilíndrica utilizada como combustível. Um fio de algodão de 0,15 m foi anexado à pastilha de biomassa e posto em contato com o fio metálico de ignição, tipo Choronel C, com 0,1 m de comprimento ligado aos terminais elétricos da bomba.

Em seguida, esta foi preenchida com oxigênio sintético a 3,04 MPa de pressão. A bomba foi mergulhada completamente em um banho de água contendo 2,5 litros, provido de agitação em um recipiente de paredes duplas que envolve o calorímetro. A temperatura no interior das paredes que envolvem o calorímetro é constante em 25°C.

Para a ignição, os terminais da bomba foram submetidos a uma corrente alternada de 8 Ampères provocando o início do processo de combustão da pastilha de biomassa. Em conseqüência da combustão, há liberação de energia, elevando a temperatura da água que envolve o corpo da bomba. Essa elevação de temperatura (T) é medido em função do tempo, conforme a Equação 2.12.

$$T = T_c - T_a - r_1(a - b) - r_2(c - b)$$
(2.12)

na qual:

a é o tempo de ignição,

b é o tempo em que a elevação de temperatura alcança 60% do total,

c é tempo em que a temperatura torna-se constante,

 T_a é a temperatura no momento da ignição,

 T_c é a temperatura no tempo c,

 r_1 razão na qual a temperatura elevou-se durante o período de cinco minutos antes da ignição, e

 r_2 é a razão na qual a temperatura elevou-se durante o período de cinco minutos após o tempo na qual a temperatura permanece constante (*c*).

Com isso, o poder calorífico superior foi calculado a partir da Equação 2.13:

$$PCS = \frac{T \times A - e_1 - e_2}{m} \tag{2.13}$$

na qual:

A é o equivalente em água do calorímetro (ml),

 e_1 é correção para o calor de formação do ácido nítrico (cal)

 e_2 é a correção para o poder calorífico do fio de ignição (cal)

m é a massa da amostra (kg).

As correções e_1 e e_2 devem ser descontadas no cálculo final. Para e_1 a correção foi em mililitros de solução de álcali padrão (alaranjado de metila) usado na titulação do ácido. Para e_2 , a correção foi para 2,3 vezes o comprimento do fio de Cromel C consumido em cm.

Para esta propriedade, todas as análises foram feitas em duplicata, sendo o resultado final apresentado como a média aritmética dos valores obtidos.

Neste capítulo apresentaram-se as biomassas selecionadas e suas respectivas procedências, as metodologias escolhidas e/ou aprimoradas para a realização do trabalho.

Como técnica padrão aplicada diretamente pode-se citar a norma ASTM D240 – 64 para Poder Calorífico Superior. Devido à não existência de normas específicas para caracterização de biomassas, as demais normas foram remodeladas para fins de aplicação aos materiais utilizados no trabalho.

Capítulo 3 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos neste trabalho e discussão, referentes às caracterizações física, térmica e de escoabilidade das biomassas escolhidas, baseadas nas técnicas descritas no Capítulo 2.

3.1 Caracterizações físicas

No processo de caracterização física, foram obtidos os dados de distribuição granulométrica com determinação do diâmetro de Sauter, dados de esfericidade, massa específica real e massa específica doleito aerada e batida, além de dados de morfologia das amostras.

3.1.1 Distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas

As distribuições granulométricas das biomassas estão apresentadas individualmente nas Figuras 3.1 a 3.6 como resultados do processo de peneiramento bem como o diâmetro médio de Sauter (Tabelas 3.1a e 3.1b). Essas distribuições determinam o quão representativas estão às amostras e a efetividade do processo de separação das partículas. Os diâmetros escolhidos foram de 427 µm a 2738 µm.

A partir deste momento, as discussões serão feitas referenciando o diâmetro de Sauter e apresentados em mícron (μ m = 10⁻⁶ m), a fim de visualizar facilmente a ordem de grandeza de cada amostra.

Observa-se nestas Figuras que: para a casca de arroz, ouriço de castanha, caixeta e jequitibá rosa as maiores frações do diâmetro de referência ficaram superiores 80%. Para o bagaço de cana e a fibra de coco, que são materiais fibrosos e alongados, a separação tornou-se mais difícil, apresentando pequenas frações (abaixo de 20%) em diâmetros consecutivos para cima e para baixo, obedecendo ao padrão Tyler de raiz de 2

Casca de arroz (Oryza sativa L.)





Figura 3.1. Distribuição granulométrica da casca de arroz e diâmetro médio de Sauter

Bagaço de cana (Saccharum officinarum L.)

Nas Figuras 3.2a a 3.2d apresentam as distribuições granulométricas do bagaço de cana-deaçúcar e os diâmetros médios de Sauter correspondentes a 501 μ m; 700 μ m; 1400 μ m e 1970 μ m.



Figura 3.2. Distribuição granulométrica do bagaço de cana e diâmetro médio de Sauter

Fibra de Coco (Cocos nucifera)



Nas Figuras 3.3a a 3.3e encontram-se as distribuições granulométricas da fibra de coco e seus respectivos diâmetros de Sauter, sendo este 427 μ m, 677 μ m, 896 μ m, 1275 μ m e 1893 μ m.

Figura 3.3. Distribuição granulométrica da fibra de coco e diâmetro médio de Sauter

Ouriço de Castanha do Brasil (Bertholletia excelsa)

As Figuras 3.4a até 3.4e apresentam as distribuições granulométricas do ouriço da castanha do Brasil e seus respectivos diâmetros médios de Sauter, sendo estes: 496 μ m, 706 μ m, 989 μ m, 1494 μ m, 2080 μ m.



Figura 3.4. Distribuição granulométrica do Ouriço de Castanha do Brasil e diâmetro médio de Sauter

Caixeta (Tabebuia cassiniodes Lam.)

Nas Figuras 3.5a até 3.5e apresentam as distribuições granulométricas da madeira caixeta e os diâmetros médios de Sauter correspondentes a 500 μ m; 715 μ m; 1006 μ m, 1420 μ m e 1993 μ m.



Figura 3.5. Distribuição granulométrica da caixeta e diâmetro médio de Sauter

Jequitibá rosa (Cariniana legalis)

As Figuras 3.6a até 3.6e apresentam as distribuições granulométricas da madeira jequitibá rosa e os diâmetros médios de Sauter correspondentes a 494 μ m; 681 μ m; 986 μ m, 1395 μ m e 2008 μ m.



Figura 3.6. Distribuição granulométrica do jequitibá rosa e o diâmetro médio de Sauter

					Esfericidade (φ)			
Material	$\bar{d}_p(\mu m)$	$\rho(kg/m^3)$	$\rho_{bA}(kg/m^3)$	$ ho_{bB}(kg/m^3)$	1° Wadell	2° Riley	3° Curray	4° Massarani e
					1935	1941	1951	Peçanha 1986
	1023	$1616,2 \pm 8,45$	$150,87 \pm 2,85$	$175,51 \pm 1,95$	$0,46 \pm 0,12$	$0,37 \pm 0,07$	$0,19 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,04$
Casca de arroz	1431	$1712,2 \pm 4,22$	$121,46 \pm 0,07$	$142,62 \pm 1,92$	$0,43 \pm 0,18$	$0,42 \pm 0,35$	$0,21 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,03$
(Oryza sativa L.)	2189	$1714,5 \pm 9,87$	$113,38 \pm 5,18$	134,41 ± 1,57	$0,\!47\pm0,\!07$	$0,\!49\pm0,\!04$	$0,25 \pm 0,04$	$0,25 \pm 0,49$
	2738	$1701,3 \pm 13,25$	$112,07 \pm 0,80$	$133,30\pm0,19$	$0,\!45\pm0,\!03$	$0,\!53\pm0,\!01$	$0,\!27\pm0,\!02$	$0,29 \pm 0,01$
Bagaço de cana ¹	501	$1462,6 \pm 7,10$	$58,71 \pm 0,39$	$79,37 \pm 0,49$	$0,47 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,04$	$0,16 \pm 0,04$	$0,05 \pm 0,02$
	700	$1550,5 \pm 4,70$	$49,07 \pm 0,13$	$68,28 \pm 0,55$	$0,\!48\pm0,\!06$	$0,\!24\pm0,\!05$	$0,\!17\pm0,\!05$	$0,06 \pm 0,03$
	925	1558,9 ± 7,11	$43,39 \pm 2,83$	$61,18 \pm 0,13$	$0,\!49\pm0,\!07$	$0,\!24\pm0,\!06$	$0,\!18\pm0,\!06$	$0,06 \pm 0,03$
	1400	$1589,7 \pm 6,89$	$37,11 \pm 0,16$	$53,64 \pm 1,11$	$0,\!54\pm0,\!09$	$0,28 \pm 0,08$	$0,22 \pm 0,08$	$0,09 \pm 0,05$
	1970	$1595,1 \pm 23,96$	$32,28 \pm 0,51$	$47,67 \pm 0,37$	$0,56 \pm 0,11$	$0,31 \pm 0,11$	$0,25 \pm 0,12$	$0,11 \pm 0,09$
	427	$1470,0 \pm 17,06$	$19,74 \pm 0,93$	$32,82 \pm 1,36$	$0,36 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,01$
Fibra de coco	677	$1460,1 \pm 15,60$	$21,42 \pm 1,78$	$37,40 \pm 3,50$	$0,\!40\pm0,\!04$	$0,\!18\pm0,\!01$	$0,11 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,01$
	896	$1443,7 \pm 21,88$	$26,17 \pm 0,99$	$46,90 \pm 3,47$	$0,42 \pm 0,06$	$0,\!19\pm0,\!02$	$0,12 \pm 0,04$	$0,04 \pm 0,02$
	1275	$1364,1 \pm 6,80$	$34,60 \pm 2,16$	$62,50 \pm 2,79$	$0,34 \pm 0,06$	$0,\!15\pm0,\!03$	$0{,}08\pm0{,}05$	$0,02 \pm 0,03$
	1893	$1328,2 \pm 10,60$	$38,17 \pm 0,14$	$70,70 \pm 3,36$	$0,31 \pm 0,04$	$0,12 \pm 0,01$	$0,\!06\pm0,\!02$	$0,01 \pm 0,01$

Tabela 3.1a. Dados experimentais das propriedades físicas das biomassas

Os dados bagaço de cana foram extraídos do trabalho de Matos e Tannous (2011), com exceção das massas específicas aerada e batida.

	_				Esfericidade (φ)			
Material	$\bar{d}_p(\mu m)$	$\rho(kg/m^3)$	$ ho_{bA}(kg/m^3)$	$ ho_{bB}(kg/m^3)$	1° Wadell	2° Riley	3° Curray	4º Massarani e
					(1935)	(1941)	(1951)	Peçanha (1986)
	496	$1460,0 \pm 0,61$	$371,43 \pm 1,28$	436,68 ± 2,96	_	$0,74 \pm 0,12$	-	$0,55 \pm 0,17$
Ouriço de	706	$1454,4 \pm 0,22$	$380,76 \pm 1,15$	$442,74 \pm 1,40$	-	$0,73 \pm 0,11$	_	$0,55 \pm 0,17$
castanha	989	$1461,7 \pm 0,44$	$388,78 \pm 0.03$	$446,45 \pm 1,05$	_	$0,\!68 \pm 0,\!11$	_	$0,48 \pm 0,15$
do Brasil	1494	$1455,7 \pm 0,59$	$397,62 \pm 0,55$	$449,80 \pm 0,39$	_	$0,71 \pm 0,12$	_	$0,52 \pm 0,17$
	2080	$1462,0 \pm 2,08$	$391,44 \pm 0,94$	435,02±1,54	_	$0,\!72\pm0,\!12$	_	$0,53 \pm 0,17$
	500	$1549,1 \pm 8,17$	$111,60 \pm 0,20$	$136,40 \pm 0,09$	$0,43 \pm 0,06$	$0,\!48 \pm 0,\!05$	$0,28 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,04$
Caixeta	715	$1564,1 \pm 2,09$	$109,09 \pm 0,98$	$130,48 \pm 1,55$	$0,\!52\pm0,\!06$	$0,\!51\pm0,\!04$	$0,\!35\pm0,\!06$	$0,26 \pm 0,04$
(Tabebuia	1006	$1582,2 \pm 6,14$	$104,24 \pm 0,90$	$123,15 \pm 0,07$	$0,\!54\pm0,\!08$	$0,\!54\pm0,\!08$	$0,37 \pm 0,07$	$0,29 \pm 0,08$
Cassinoides Lam)	1420	$1596,2 \pm 5,12$	$101,67 \pm 0,33$	$117,09 \pm 0,25$	$0{,}58\pm0{,}05$	$0,\!60\pm0,\!06$	$0,42 \pm 0,05$	$0,36 \pm 0,07$
	1993	$1655,5 \pm 4,59$	$96,55 \pm 0,23$	$109,71 \pm 0,02$	$0,\!59\pm0,\!04$	$0,\!64\pm0,\!06$	$0,46 \pm 0,04$	$0,42 \pm 0,11$
	494	$1564,6 \pm 0,003$	$147,00 \pm 1,69$	$179,00 \pm 2,16$	$0,42 \pm 0,06$	$0,32 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,04$	$0,11 \pm 0,03$
Jequitibá rosa	681	$1588,8 \pm 0,007$	$162,20 \pm 0,69$	$194,81 \pm 1,12$	$0,\!43 \pm 0,\!04$	$0,32\pm0,02$	$0,\!20\pm0,\!02$	$0,10 \pm 0,01$
(Cariniana	986	$1569,6 \pm 0,017$	$162,00 \pm 0,22$	194,00 ± 1,81	$0,\!42\pm0,\!05$	$0,32\pm0,03$	$0,20 \pm 0,03$	$0,\!10\pm0,\!02$
Legalis)	1395	$1581,6 \pm 0,011$	$146,00 \pm 2,85$	$180,02 \pm 2,24$	$0,\!43\pm0,\!05$	$0,34\pm0,03$	$0,21 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,02$
	2008	$1553,4 \pm 0,005$	$112,30 \pm 2,63$	142,45 ± 3,65	$0,\!42\pm0,\!06$	$0,33 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,02$

Tabela 3.1b. Dados experimentais das propriedades físicas das biomassas

3.1.2 Esfericidade

As biomassas estudadas foram consideradas como geometrias regulares e irregulares, a saber: esferóide prolato (casca de arroz), cilíndrica (bagaço de cana e fibra de coco), paralelepípedo retângulo (caixeta e jequitibá rosa) e irregular (ouriço de castanha do Brasil).

Os valores de esfericidade foram obtidos de acordo com procedimentos descritos no item 2.4.5 e estão apresentados na Tabela 3.1a e 3.1b e Figuras 3.7 a 3.10.

A esfericidade para a casca de arroz (Figura 3.7) manteve-se em torno de 0,45 pelo método de Wadell (1935), com um desvio máximo 4,7% com relação a média, e 9,3% com relação entre as esfericidades. Para os métodos de Riley (1941) e Curray (1951), a esfericidade aumentou com o diâmetro, com variação máxima entre diâmetros de 43% e 42%, respectivamente.

Para o método de Massarami e Peçanha, (1986) a esfericidade excedeu o dobro do valor entre o menor e o maior diâmetro médio, sendo provavelmente influenciado pela relação de comprimento e largura da partícula, associado aos diâmetros, inscrito e circunscrito.



Figura 3.7. Esfericidade da casca de arroz em relação ao diâmetro médio para os quatro métodos considerados

As esfericidades do bagaço de cana em relação ao diâmetro médio podem ser observadas na Figura 3.8a. Constata-se que a esfericidade aumenta com o diâmetro médio das partículas, sendo que este aumento é menos significativo entre os três menores diâmetros (501-925 µm) e um
aumento expressivo para os tamanhos maiores (925-1970 μ m). A esfericidade pelo método de Wadell teve diferença de 8,5% em relação à média, e 19% entre o menor e o maior diâmetro. Para Riley e Curray este aumento entre diâmetros foi de 40% e 56%.

A esfericidade pelo método de Massarani e Peçanha teve um aumento considerável excedendo o dobro do valor entre o menor e maior diâmetro.

Na Figura 3.8b para a fibra de coco, nota-se a mesma tendência de crescimento observada para o bagaço de cana até o diâmetro intermediário (896µm) e em seguida diminui para valores subseqüentes.

É possível que até o diâmetro intermediário, haja predominância do diâmetro da fibra em relação ao comprimento aumentando a esfericidade. A partir de então (896µm) o que passa a predominar é o comprimento em relação ao diâmetro da fibra, reduzindo assim a esfericidade.



Figura 3.8. Esfericidade de biomassa em função do diâmetro médio das partículas para os quatro métodos considerados

Em relação à média, a esfericidade da fibra de coco apresentou as seguintes diferenças percentuais: 13%, 19%, 33% e 66% para os métodos de Wadell, Riley, Curray e Massarani e Peçanha, respectivamente, deixando ainda mais evidente a influência da relação diâmetro x comprimento (GELDART, 1986). A partir de 896 µm foi possível identificar visualmente que as fibras são muito mais longas, excedendo a razão de comprimento/diâmetro igual a 16 vezes. Em proporcionalidade com a literatura, os dados obtidos de Wadell são bastante consistentes.

O ouriço de castanha do Brasil foi a única biomassa que não foi possível associar a nenhuma forma geométrica devido sua característica irregular. Desse modo a esfericidade foi calculada apenas pelos métodos de Riley (1941) e Massarani e Peçanha (1986).

A Figura 3.9 mostra a evolução da esfericidade em relação ao diâmetro médio das partículas. Nota-se uma constância entre as esfericidades sendo de 0,69 para Riley (variação máxima de 9%) e 0,48 para Massarani e Peçanha (variação máxima de 15%).



Figura 3.9. Esfericidade do ouriço de castanha em relação ao diâmetro médio para dois métodos

Associadas à forma de paralelepípedo, as esfericidades das duas madeiras (caixeta e jequitibá rosa) podem ser observadas na Figura 3.10 (Tabela 3.1b).



Figura 3.10. Esfericidade das madeiras em função do diâmetro médio de Sauter para os quatro métodos adotados

Para a esfericidade da caixeta nota-se na Figura 3.10a que esta cresceu com o aumento do diâmetro para todos os métodos. Em relação à média de esfericidade o menor índice de crescimento foi para o método de Wadell, com 11% de aumento e o maior foi de Massarani e Peçanha com 35% de aumento. Entre diâmetros, o método de Wadell teve aumento de 37%, Riley 33% e Curray, e Massarani e Peçanha tiveram aumentos superiores a 50%.

Para o Jequitibá rosa (Figura 3.10b) manteve uma tendência de esfericidade constante com diferença de 2%, 6% e 5% para Wadell, Riley e Curray respectivamente. Para Massarani e Peçanha a esfericidade teve aumento de 20% do menor para o maior diâmetro.

3.1.3 Determinação das Massa Específica Real e do leito

Neste trabalho foram determinadas três massas específicas, sendo estas: real e massa específica do leito (aerada e batida), conforme metodologia descrita nos itens 2.4.3. e 2.4.4, respectivamente.

3.1.4 Massa Específica Real (ρ)

Para melhor visualizar os resultados, os materiais foram separados em dois grupos (Figura 3.11 e Tabela 3.1).



Figura 3.11. Massa específica real em função do diâmetro médio das partículas

Na Figura 3.11a observa-se que para o diâmetro menor o bagaço de cana (501 μ m) e fibra de coco (427 μ m) tem massa específica real praticamente coincidente em torno de 1460 kg/m³. A partir desse ponto há uma redução de massa específica para as fibras e aumento da massa específica para o bagaço de cana.

Provavelmente esse comportamento se deve ao arranjo das fibras na célula de medição, onde as amostras alocadas ocupam dois terços do volume da célula. Para o bagaço de cana, possivelmente houve um arranjo melhor na célula de medida para o diâmetros maiores, diminuindo a quantidade de vazios e aumentando a massa específica.

Aparentemente o contrário ocorre para as fibras de coco e possivelmente a diminuição da massa específica real se dê não somente pelo arranjo, mas também pelas características de porosidade das próprias partículas, como se observa nos canais abertos mostrados pela microscopia eletrônica de varredura.

A casca de arroz na Figura 3.11a e os materiais da Figura 3.11b, tendem a manter a massa específica constante à proporção que o diâmetro aumenta. Essa tendência pode indicar pouca variação no arranjo desses materiais na célula de medida ou ainda semelhanças estruturais de porosidade ou quantidade de espaços vazios entre as partículas.

3.1.5 Massa específica do leito (ρ_b) – aerada e batida

A Figura 3.12 mostra as massas específicas do leito, aerada e batida, para as seis biomassas estudadas conforme descrito no item 2.4.4.

A casca de arroz, o bagaço de cana, caixeta e os diâmetros a partir de 986 µm do jequitibá rosa apresentaram comportamentos semelhantes, onde as massas específicas diminuem à medida que o diâmetro médio aumenta. Esta diminuição é devida ao aumento da quantidade de espaços vazios entre as partículas. O mesmo comportamento foi observado por Lam et al. (2008) e Chevanam et al. (2008), na caracterização de biomassas moídas em moinho de facas e martelo, respectivamente.

As massas específicas das fibras de coco aumentaram com o diâmetro médio, isso por que as fibras menores são alongadas, finas e flexíveis, características que levam ao seu enovelamento dificultando o arranjo/empacotamento no recipiente de medida.



Figura 3.12. Massas específicas do leito, aerada e batida, das biomassas em função do diâmetro médio de Sauter

Para o ouriço de castanha, as massas específicas do leito, aerada e batida, tiveram um leve aumento com o diâmetro médio. A tendência de quase constante é observada mais acentuadamente para a massa especifica batida, pois por se tratar de material rígido, o acréscimo de massa é razoavelmente baixo.

Observou-se para todas as biomassas, que a massa específica do leito aerado é o fator determinante para o cálculo da razão de Hausner, pois o arranjo inicial das partículas é que determina a massa total do leito aerado e conseqüentemente sua massa específica.

3.1.6 Morfologia das amostras

Os resultados abaixo referem-se as metodologias adotadas no item 2.4.6.

Casca de arroz (*Oryza sativa* L.)

A Figura 3.13a mostra uma vista longitudinal de um grão de arroz com identificação de sua estrutura. Para este trabalho a casca é a parte de interesse para identificação morfológica (Figura 3.13b e c).



Figura 3.13. (a) Corte longitudinal; (b e c) Imagens de MEV da casca de arroz ($\bar{d}_p = 1431 \,\mu\text{m}$)

Figura 3.14 mostra uma imagem na posição frontal de MEV em diferentes magnitudes da casca de arroz de diâmetro 2738 μ m, com fratura por N₂ líquido. Observa-se nesta Figura as seguintes camadas:

- A camada externa identificada pelo farelo ou palha;
- A camada intermediária referente ao pericarpo e,
- A camada esbranquiçada composta pela camada de aleurona (camada de proteína) encontrada no endosperma de muitas sementes.

Estas estruturas associadas ao elevado teor de sílica da superfície externa (JAUBERTHIE et al. 2000) dão à casca a característica de resistência. Além disso, é possível visualizar o formato de esferóide prolato.



(a) 150x



(b) 500x



(c) 100x

(d) 2500x

Bagaço de Cana (Saccharum officinarum L.)

Nas Figuras 3.15 a e b evidencia-se a forma cilíndrica do bagaço de cana ($\bar{d}_p = 501 \ \mu m$) que corrobora a geometria associada no estudo de esfericidade. As Figuras 3.15c e d, e 3.16, por sua vez, mostram a estrutura interna do bagaço de cana (dp = 1970 μ m) através dos cortes transversais e fratura com nitrogênio liquido, respectivamente e conforme descrito no item 2.4.6.

A Figura 3.15c (aumento de 200x) mostra o bagaço com uma característica esponjosa com elevada porosidade. Para um aumento de 2000x, pode-se observar a estrutura de malha formada pela interligação da região celulósica.



(a) 200x

Efeito provocado pela lâmina no material



(b) 500x

Canais de interligação



(c) 200x



LRAC/FED/UNICAMP 16-4





A visualização da partícula de bagaço pela fratura com nitrogênio (Figura 3.16), é a estrutura com riqueza de detalhes, sendo possível identificar o lúmen (parede celular) e elementos de vaso (explicitados na cor esbranquiçada) que compõem o bagaço.



(a) 1000x

(b)2000x

Figura 3.16. Imagens MEV para bagaço de cana mediante processo de criofratura $\overline{(d_p = 1970 \mu m)}$

Fibra de coco (Cocos nucifera)

Para a fibra do coco de $\bar{d}_p = 896 \,\mu m$ com corte frontal e ciofratura, observa-se o formato cilíndrico (Figura 3.17a e 3.17b) e pequenos dutos (Figura 3.18a e 3.18b) da partícula.





(b)1000x

Figura 3.17. Imagens MEV fibra de coco - corte com lâmina ($\bar{d}_p = 896 \,\mu m$)

Nas imagens fraturadas Figura 3.18 observa-se na vista frontal a forma cilíndrica com lúmen bem definido que também foi identificado por Fagury (2005) em seu trabalho de caracterização de fibras.



Figura 3.18. Imagens MEV para estrutura interna da fibra de coco mediante processo de criofratura $(\bar{d}_p = 896 \mu m)$

Ouriço de castanha do Brasil (Bertholletia excelsa)

Por se tratar de material extremamente rígido não foi possível o fratura, tanto por lâmina quanto pela criofratura. Observa-se a forma irregular das partículas do ouriço de castanha (Figura 3.19) e estrutura porosa.



Figura 3.19. Imagens MEV para o ouriço de castanha do Brasil ($\bar{d}_p = 496 \,\mu m$)

Além disso, a Figura 3.20 mostra uma imagem do ouriço para um $\bar{d}_p = 989 \mu m$, onde se observa a estrutura fibrosa (Figure 3.20a) semelhante à madeira, envolvida por uma camada superficial constituída de pequenos grânulos contendo poros abertos e de tamanhos variados (Figura 3.20b).



Figura 3.20. Imagens MEV do ouriço de castanha do Brasil ($\bar{d}_p = 989 \ \mu m$)

Esta estrutura entrelaçada oferece grande resistência mecânica ao ouriço o que dificulta o acesso às sementes no interior da cápsula e atribui ao ouriço características de madeira altamente resistente.

Caixeta (Tabebuia cassiniodes Lam.)

A Figura 3.21 apresenta imagens da caixeta representada de corte longitudinal de uma partícula semelhante ao beneficiamento de pranchas de madeira, de $\bar{d}_p = 1006\mu m$. Observa-se estruturas dos elementos de raio multiseriados, que se prolongam no sentido perpendicular as fibras.



Elementos de raio multisseriados

Figura 3.21. Imagens de MEV da caixeta - corte com lâmina ($\bar{d}_p = 1006\mu m$)

Na Figura 3.22 estão imagens na posição frontal, obtidas por fraturamento com Nitrogênio líquido. Nesta imagem pode-se identificar claramente a estrutura da parede celular (lúmen).





Jequitibá rosa (Cariniana legalis)

Para o caso do jequitibá rosa nota-se através da Figura 3.23 elementos de raio uniseriados característicos de madeiras duras. Isto pode ser melhor visualizado e identificado através da criofratura, onde na Figura 3.24 são vistas de como filetes contínuos e normais a posição dos elementos de raio axiais.



Elemento de raio unisseriado

(a) 2000x

(b) 5000x

Figura 3.23. Imagens MEV para jequitibá rosa - corte com lâmina ($\bar{d}_p = 501 \mu m$)



Figura 3.24. Imagens MEV para jequitibá rosa mediante processo de criofratura ($\bar{d}_p = 501 \mu m$)

Em vista destes resultados conclui-se que as imagens obtidas por MEV nesta fase da caracterização identificam as formas das partículas, microestruturas como lúmen e parede celular e elementos de raio. A técnica de criofratura com N_2 é uma técnica de visualização excelente também para estruturas de biomassas, o que justifica um investimento pela qualidade dos resultados finais.

3.2. Caracterização de Escoabilidade

Nesta fase de caracterização estão os resultados obtidos para as propriedades de compactação e escoabilidade dos materiais representados pela razão de Hausner, índice de

compressibilidade de Carr, índice de porosidade do leito e ângulo de repouso.

3.2.1. Índice de Hausner (IH) e índice de compressibilidade de Carr (ICC)

A escoabilidade das biomassas foi caracterizada mediante IH e ICC conforme definidos nos itens 2.5.1 e 2.5.2 e estão apresentados na Figura 3.25 e Tabela 3.2. Nesta Figura 3.25 observa-se que apenas o ouriço de castanha do Brasil e a caixeta seguiram a tendência de diminuição da escoabilidade com o aumento do diâmetro, comportamento previsto pela literatura.

Possivelmente a rigidez do ouriço de castanha moído tende a diminuir as condições de atrito entre partículas melhorando o fluxo. A razão de Hausner para o ouriço ficou abaixo de 1,20 e pelo índice de Carr abaixo de 15, indicando excelente fluxo, de acordo com a literatura consultada.

Para a caixeta, a forma e as condições de atrito entre partículas pode ter sido o fator determinante para o comportamento de boa escoabilidade, com razão de Hausner abaixo de 1,22 e Carr abaixo de 18. A casca de arroz e o bagaço de cana e as fibras de coco seguiram tendência oposta à caixeta e ouriço de castanha. Estas duas biomassas tiveram razão de Hausner e índice de Carr aumentando com o aumento do diâmetro. Esse comportamento de aumento da razão de Hausner e do Índice de Carr com o aumento do diâmetro da partícula não foi previsto em nenhum trabalho da literatura consultada.

Um melhor empacotamento influencia diretamente a razão de Hausner. Para este caso particular o empacotamento pode estar relacionado dimensões do aparato de medida que podem ter favorecido o arranjo e acomodação das partículas, no entanto, para comprovação desta hipótese é necessário refazer os experimentos variando as dimensões do funil, principalmente o diâmetro da extremidade inferior.

Se comprovado a influência do aparato de medida, devem-se recomendar dimensões propicias para partículas de acordo com suas características de tamanho, forma e proporções relativas de comprimento, espessura e largura, além de características de flexibilidade.

66

Biomassa	$ar{d}_p$.	Índices		Porosidade do leito		Ângulo de repouso	
Diomassa		Razão de Hausner	Índice de Carr	Aerado	Batido	Estático	Dinâmico
Casca de arroz	1023	$1,16 \pm 0,01$	$14,04 \pm 0,97$	0,91	0,89	$37,20 \pm 3,55$	$45,70 \pm 1,15$
	1431	$1,17 \pm 0,02$	$14,84 \pm 1,14$	0,93	0,92	$30,40 \pm 6,25$	$48,70 \pm 1,53$
	2189	$1,19 \pm 0,04$	$15,64 \pm 3.54$	0,93	0,92	$29,20 \pm 1,70$	$51,00 \pm 2,00$
	2738	$1,19 \pm 0,01$	$15,93 \pm 0,52$	0,93	0,92	$21,40 \pm 1,01$	$57,70 \pm 2,52$
Bagaço de cana	501	$1,35 \pm 0,02$	$26,02 \pm 0,93$	0,96	0,95	$40,70 \pm 2,04$	$63,33 \pm 0,58$
	700	$1,39 \pm 0,01$	$28,14 \pm 0,58$	0,97	0,96	$41,30 \pm 4,51$	$61,00 \pm 1,00$
	925	$1,41 \pm 0,09$	$29,09 \pm 4,73$	0,97	0,96	$39,30 \pm 2,18$	$58,33 \pm 0,58$
	1400	$1,45 \pm 0,03$	$30,82 \pm 1,77$	0,98	0,97	$35,00 \pm 4,09$	$57,33 \pm 0,58$
	1970	$1,48 \pm 0,02$	$32,29 \pm 0,92$	0,98	0,97	$30,30 \pm 5,01$	$56,33 \pm 1,15$
Fibra de coco	427	$1,66 \pm 0,07$	$39,83 \pm 2,42$	0,99	0,98	$60,10 \pm 3,15$	$63,00 \pm 2,52$
	677	$1,75 \pm 0,17$	$42,72 \pm 4,77$	0,99	0,98	$61,\!60 \pm 4,\!85$	$62,20 \pm 2,65$
	896	$1,79 \pm 0,08$	$44,20 \pm 2,69$	0,98	0,97	$51,80 \pm 1,94$	$60,00 \pm 1,00$
	1275	$1,81 \pm 0,27$	$44,64 \pm 2,75$	0,98	0,96	$45,10 \pm 3,26$	$60,00 \pm 3,00$
	1893	$1,84 \pm 0,43$	$45,52 \pm 2,97$	0,98	0,96	50,30 ±2,65	$58,33 \pm 1,53$

Tabela 3.2a. Dados experimentais dos índices escoabilidade das biomassas

Biomassa	ā	Índices		Porosidade d leito		Ângulo de repouso	
	u_p	Razão de Hausner	Índice de Carr	Aerado	Batido	Estático	Dinâmico
Queine la	496	$1,17 \pm 0,01$	$14,86 \pm 0,30$	0,75	0,70	$31,50 \pm 2,05$	$41,00 \pm 1,73$
	706	$1,16 \pm 0,01$	$14,00 \pm 0,27$	0,74	0,70	$30,70 \pm 1,38$	$40,67 \pm 2,08$
	989	$1,15 \pm 0,01$	$12,92 \pm 0,21$	0,73	0,69	$30,10 \pm 2,55$	$39,33 \pm 0,58$
castanna	1494	$1,13 \pm 0,01$	$11,60 \pm 0,04$	0,73	0,69	$24,\!30\pm0,\!80$	$39,37 \pm 0,58$
	2080	$1,14 \pm 0,04$	$12,04 \pm 3,41$	0,73	0,70	$20,40 \pm 2,32$	$39,33 \pm 0,58$
	500	$1,22 \pm 0,01$	$18,16 \pm 0,05$	0,93	0,91	$43,80 \pm 1,09$	$57,70 \pm 1,53$
	715	$1,21 \pm 0,01$	$16,39 \pm 0,98$	0,93	0,92	$40,30 \pm 4,63$	$59,70 \pm 0,58$
Caixeta	1006	1,18 ±0,01	$15,35 \pm 0,68$	0,93	0,92	$37,10 \pm 3,20$	$61,30 \pm 1,53$
	1420	$1,15 \pm 0,01$	$13,18 \pm 0,10$	0,94	0,93	$36,10 \pm 0,72$	$63,70 \pm 2,52$
	1993	$1,14 \pm 0,01$	$12,00 \pm 0,21$	0,94	0,93	$33,70 \pm 1,04$	$65,00 \pm 2,00$
	494	$1,22 \pm 0,02$	$17,88 \pm 0,95$	0,91	0.88	$47,50 \pm 2,46$	$52,30 \pm 6,35$
Jequitibá rosa	681	$1,20 \pm 0,01$	$16,74 \pm 0,47$	0,90	0.88	$42,10 \pm 0,14$	$52,70 \pm 2,31$
	986	$1,20 \pm 0,01$	$16,49 \pm 0,34$	0,90	0.88	$32,5 \pm 1,08$	$51,10 \pm 10,39$
	1395	$1,23 \pm 0,01$	$18,89 \pm 0,53$	0,91	0.89	$29,00 \pm 1,19$	$47,00 \pm 3,46$
	2008	$1,27 \pm 0,03$	$21,10 \pm 1,35$	0,94	0.92	$29,60 \pm 2,65$	$46,30 \pm 3,21$

Tabela 3.2b. Dados experimentais dos índices escoabilidade das biomassas



Figura 3.25. Razão de Hausner e índice de compressibilidade de Carr em função do diâmetro médio de Sauter

À parte as discussões anteriores, a madeira jequitibá rosa teve comportamento intermediário com redução até 986 µm e aumento para diâmetros posteriores.

Esse comportamento envolve as duas discussões anteriores, tanto para crescimento quanto diminuição dos índices com o aumento do diâmetro. A forma das partículas e as condições de atrito certamente influenciaram o comportamento, no entanto, nesse momento não é possível estabelecer razões específicas que justifiquem de forma definitiva o resultado.

São necessários testes com intervalos granulométricos maiores, variando desde a condição de pó 50 µm até aproximadamente 5000 µm, para observar se há aumento e diminuição em todo o intervalo e então propor uma interpretação definitiva para o resultado.

3.2.2 Porosidade do leito aerado e batido

A porosidade do leito deve-se à quantidade de vazios, e esta característica varia de acordo com o nível de compactação dos materiais quando estes se encontram em espaço limitado, como um cilindro de volume constante. A Figura 3.26 mostra o nível de porosidade do leito em relação ao diâmetro médio das biomassas utilizadas nesse trabalho.

Dados da literatura (Lam et al., 2008; Chevanam et al., 2008), indicam que a porosidade do leito deve aumentar com o aumento do diâmetro médio, devido a uma diminuição do nível de empacotamento. Para a faixa de diâmetros deste trabalho (B e D da classificação de Geldart), porém, este comportamento foi observado, mas a diferença percentual entre o maior e menor diâmetro fica em torno de 3% demonstrando-se quase constante. A porosidade da fibra de coco e do ouriço de castanha diminuiu com o aumento do diâmetro, mas da mesma maneira esta diminuição foi de apenas 2%.

Em uma comparação entre as Figuras, 3.12 e Figura 3.26, pode-se notar a relação inversa entre a massa específica e a porosidade do leito, sendo que para um elevado índice de porosidade leva à uma redução da massa específica do leito.

Tomando como exemplo, o ouriço de castanha do Brasil, este teve menor índice de porosidade do leito (entre 0,68 e 0,76) e maior massa específica do leito (370 a 450 kg/m³).

70



Figura 3.26. Evolução da porosidade do leito em função ao diâmetro médio de Sauter

3.2.3. Ângulo de repouso (AOR)

O ângulo de repouso foi determinado para as partículas entre 494 μ m e 2738 μ m para seis biomassas de acordo com os métodos previamente estabelecidos (estático e dinâmico) e descritos no item 2.5.3, e os resultados estão apresentados na Tabela 3.2 e Figura 3.29.

Para o ângulo de repouso estático todos os materiais tiveram diminuição do ângulo de repouso (AOR) com o aumento do diâmetro médio das biomassas, com exceção da fibra de coco que mostrou uma tendência não definida (formato de "S"). Isto é justificado pela queda, arranjo e espalhamento das partículas sobre a base de medição levando a uma diminuição do cume do cone e conseqüentemente à redução do ângulo de repouso (Figura 3.27).



Casca de arroz



Bagaço de cana



Fibra de coco



Ouriço de castanha do Brasil

Caixeta

Jequitibá rosa

Figura 3.27. Arranjo de partículas sobre a base para o maior diâmetro de cada material (em torno de $2000 \ \mu m$)

A variação obtida entre os ângulos de repouso estático em função do diâmetro médio foi da seguinte forma: fibra de coco (19,6%), caixeta (30%), bagaço de cana (36,1%), ouriço de castanha do Brasil (54,3%), jequitibá rosa (60,3%) e casca de arroz (73,5%). Observa-se com

isso que, exceção da fibra de coco, a maior e a menor influência do diâmetro sobre o ângulo de repouso estático aconteceu com a da casca de arroz e a caixeta, respectivamente. A diminuição do AOR/massa específica *bulk* também foi observada por Geldart (2006) na aplicação de materiais finos e coesivos, sendo estes: bicarbonato de sódio (26 μ m a 160 μ m), FCC (8 μ m a 80 μ m) cinzas de soda (25 μ m a 80 μ m) e lactose (20 μ m a 50 μ m).

Para o ângulo de repouso dinâmico, os materiais tiveram comportamentos distintos, sendo estes crescentes (caixeta e casca de arroz) e decrescentes (bagaço de cana, fibra de coco, ouriço de castanha e jequitibá rosa) com relação ao aumento do diâmetro médio das biomassas. Isso se justifica pelo fato de que as medidas foram feitas para o primeiro escorregamento ou descolamento do material em relação à parede do cilindro rotativo (Figura 3.28)



(a) Ouriço de castanha do Brasil – $\bar{d}_p = 496 \,\mu\text{m}$



(b) Fibra de coco – $\bar{d}_p = 681 \ \mu m$



Jequitibá rosa – $\bar{d}_p = 2008 \,\mu\text{m}$

Figura 3.28. Descolamento em relação à perede do cilindro rotativo usado na medida de AOR dinâmico



Figura 3.29. Ângulos de repouso estático e dinâmico em função do diâmetro médio de Sauter

O movimento de rotação do cilindro levou a um melhor arranjo das partículas maiores da casca de arroz e da caixeta devido seu formato esferóide e flocos, respectivamente à casca e caixeta. Para as outras biomassas o movimento de rotação levou a uma melhor estabilidade para os diâmetros menores e esta diminuiu com o aumento do diâmetro das partículas.

A variação obtida entre os ângulos de repouso dinâmico foi da seguinte ordem: ouriço de castanha do Brasil (6%), fibra de coco (8%), caixeta e jequitibá rosa (12%), bagaço de cana (12,4%) e casca de arroz (17,6%). Com exceção da fibra de coco, a maior e a menor influência do diâmetro sobre o ângulo de repouso dinâmico foi da casca de arroz e do ouriço de castanha do Brasil, respectivamente.

Dados de ângulo de repouso dinâmico como estes são importantes para se projetar/estruturar plataformas de descarregamento de onde envolvem processos nos quais os materiais (biomassa) estarão em movimento.

3.2.4. Proposta de relação entre indicadores de escoabilidade para biomassas

Como ponto de partida foi associado à razão de Hausner e ângulo de repouso estático e dinâmico para verificar o comportamento das diferentes biomassas (Figura 3.30). Observa-se que o ângulo de repouso dinâmico tem a melhor relação com a razão de Hausner, com crescimento ou diminuição linear deste índice. Observa-se ainda a excepcionalidade do ouriço da castanha do Brasil na qual o ângulo de repouso permanece praticamente constante com variação máxima de 6%.

Uma questão importante a ser destacada aqui é que se observado o conjunto de resultados (Figuras 3.30), tem-se a imediata impressão de que, com exceção do bagaço de cana e fibra de coco, todos os materiais demonstram excelente escoabilidade conforme estabelecido por Hausner e Carr. A prática experimental associada às medidas de ângulo de repouso demonstra porém, limitações inerentes à escoabilidade de cada um dos materiais.



Figura 3.30. Ângulos de repouso estático e dinâmico em função do diâmetro médio de Sauter

Assim, buscando associar os índices de escoabilidade, RH, ICC e ângulo de repouso, tomando como base o trabalho de Geldart et al. (2006), para partículas finas, propõe-se a seguinte relação para as biomassas deste trabalho:

Considerando o crescimento linear com um padrão de materiais com excelente escoabilidade, estabeleceu-se uma reta formando 45° entre o eixo horizontal (Razão de Hausner e Carr) e vertical (ângulo de repouso) interligando os pontos indicativos de escoabilidade boa/excelente até escoabilidade difícil (Tabela 3.3) para ambos os índices (Figura 3.31 e 3.32). Como resultado destas associações, mostrado na Tabela 3.4, foi proposta uma nova relação entre os limites de escoabilidade para biomassas estudadas.



Figura 3.31. Relação de escoabilidade entre ângulo de repouso e razão de Hausner para biomassas



Figura 3.32. Relação de escoabilidade entre ângulo de repouso e índice de Carr para biomassas

Carr (1965) (%)	AOR (°)	Classificação	Hausner (1967)	Classificação
5 - 16%	25 - 30	Excelente	< 1,25	Boa
18 - 21%	30 - 38	Boa	aditivo	Boa com aditivo
23 - 35%	38 - 45	Pobre	aditivo	Boa com aditiva
33 - 38%	45 – 55	Muito Pobre	> 1,5	Difícil

Tabela 3.3: Tabela dos Índices da Literatura

Tabela 3.4: Proposta de classificação de escoabilidade para biomassas baseado razão de Hausner e índice de Carr

Nova proposta de escoabilidade								
AOR Estático (°)	(°)AOR Dinâmico (°)R. HausnerÍndice de Carr (%)Classes de Escoal							
10 - 30	30 - 45	1 – 1,30	5 - 15	Classe 1	Boa			
30 - 45	45 – 55	1,30 - 1,50	15 – 25	Classe 2	Razoável			
45 – 55	55 - 65	1,50 – 1,80	25 - 35	Classe 3	Baixa			
> 55	> 65	> 1,80	> 35	Classe 4 e 5	Difícil			

3.3 Caracterização Térmica

No processo de caracterização térmica, constam dados da análise imediata e poder calorífico superior dos materiais.

3.3.1 Análise Imediata

Os resultados da análise imediata das biomassas estão apresentados nas Tabelas 3.5a e 3.5b. Utilizando-se um grama de material para todos os ensaios, a biomassa mostrou pouca variação do teor de umidade (base úmida) para os diâmetros entre 427 e 2738 μ m, sendo a menor umidade do bagaço de cana (2,6%) e a maior da fibra de coco (10,5%).

Para a maioria dos materiais, o teor de voláteis (base seca) manteve-se entre 70% e 90%, com o teor de cinzas da casca de arroz, em torno de 16%, figurando como o mais elevado entre os materiais analisados. Para as outras biomassas o teor de cinzas manteve-se abaixo de 2%.

Os percentuais de voláteis para as duas madeiras, o bagaço de cana e o ouriço de castanha do Brasil foram os mais elevados entre as biomassas, tendo percentual médio de 84%. A casca de arroz e as fibras de coco tiveram percentuais médios de teor de materiais voláteis de 69 e 77% respectivamente. Este percentual elevado demonstra a presença de elevada quantidade de extrativos volatilizáveis ou outros constituintes químicos de cadeia mais curta (NOGUEIRA e RENDEIRO 2008).

Biomassa	$ar{d}_p \left(\mu m ight)$		PCS (MI/kg)			
Diomassa		Umidade (% bu)	Voláteis (% bs)	Carbono Fixo (%bs)	Cinzas (%bs)	I CS (MJ/Kg)
	1023	$6,08 \pm 0,83$	$68,74 \pm 0,94$	15,03	$16,32 \pm 0,27$	15,24
Casaa amaz	1431	$5,74 \pm 0,89$	$68,72 \pm 0,52$	14,74	$16,54 \pm 0,64$	15,32
Casca arroz	2189	$6,07 \pm 0,73$	$69,05 \pm 0,53$	14,32	$16,03 \pm 0,35$	15,82
	2738	$5,94 \pm 0,83$	$68,67 \pm 0,28$	15,83	$16,46 \pm 0,08$	15,85
	501	$2,32 \pm 0,08$	$87,30 \pm 0,34$	11,44	$1,27 \pm 0,11$	17,43
	700	$2,30 \pm 0,04$	$86,36 \pm 0,86$	12,59	$1,05 \pm 0,04$	18,37
Bagaço de cana	925	$2,30 \pm 0,29$	$86,73 \pm 0,66$	12,41	$0,86 \pm 0,02$	18,67
	1400	$2,36 \pm 0,01$	$86,84 \pm 0,38$	12,25	$0,91 \pm 0,09$	17,78
	1970	$2,35 \pm 0,05$	86,65 ± 0,61	12,44	$0,91 \pm 0,26$	18,10
	427	$9,20 \pm 0,46$	$77,13 \pm 0,35$	20,48	$2,39 \pm 0,14$	17,85
	677	$9,47 \pm 0,31$	$76,95 \pm 0,71$	20,44	2,62 ±0,02	17,28
Fibra de coco	896	$9,75 \pm 0,61$	$77,58 \pm 0,53$	19,71	$2,71 \pm 0,01$	17,12
	1275	$8,82 \pm 0,14$	$75,77 \pm 0,89$	21,23	$2,\!99 \pm 0,\!56$	19,00
	1893	$9,09 \pm 0,55$	$75,53 \pm 0,50$	21,40	$3,07 \pm 0,13$	18,30

Tabela 3.5a. Dados experimentais parciais da análise térmica das biomassas

Biomassa	$ar{d}_p\left(\mu m ight)$		PCS (MI/kg)			
Diomassa		Umidade (% bu)	Voláteis (%bs)	Carbono Fixo (%bs)	Cinzas (%bs)	1 CO (1413/Kg)
	496	$4,47 \pm 0,03$	$83,01 \pm 0,88$	16,66	$0,33 \pm 0,11$	18,87
Ouriaa Castanha da	706	$4,81 \pm 0,12$	$82,38 \pm 0,62$	16,97	$0,49 \pm 0,06$	19,43
Dunço Castanna do	989	$4,61 \pm 0,23$	$83,49 \pm 0,80$	16,01	$0,49 \pm 0,04$	19,00
Brasii	1494	$4,61 \pm 0,17$	$83,43 \pm 0,32$	16,35	0,22 ±0,05	19,08
	2080	$4,56 \pm 0,04$	$84,32 \pm 0,82$	15,46	$0,22 \pm 0,01$	19,15
	500	$5,22 \pm 0,01$	$85,03 \pm 0,72$	14,69	$0,28 \pm 0,01$	19,00
Coivoto (Tabohuia	715	$5,57 \pm 0,02$	$84,35 \pm 0,64$	15,34	$0,31 \pm 0,03$	18,70
Carxeta (<i>Tabebula</i>	1006	$5,21 \pm 0,03$	$84,78 \pm 0,80$	14,98	$0,24 \pm 0,04$	18,81
Cassinoides Lam)	1420	$5,24 \pm 0,09$	$84,37 \pm 0,68$	15,34	$0,29 \pm 0,02$	18,75
	1993	$5,18 \pm 0,02$	$84,09 \pm 0,81$	15,62	$0,29 \pm 0,02$	18,95
	494	$5,23 \pm 0,23$	$84,12 \pm 0,64$	15,35	$0,53 \pm 0,02$	19,24
In quitibé roco	681	$5,28 \pm 0,20$	$84,38 \pm 0,73$	15,10	$0,52 \pm 0,01$	19,21
(Cariniana Localia)	986	$5,28 \pm 0,38$	$82,25 \pm 0,71$	17,20	$0,55 \pm 0,02$	18,81
(Carimana Legails)	1395	$5,56 \pm 0,50$	$84,67 \pm 0,77$	14,78	$0,55 \pm 0,01$	18,76
	2008	$5,66 \pm 0,07$	$84,34 \pm 0,81$	15,11	$0,55 \pm 0,02$	18,38

Tabela 3.5b. Dados experimentais parciais da análise térmica das biomassas

Uma comprovação importante para efeitos de potencial térmico diz respeito ao percentual de cinzas que interfere no poder calorífico, conforme relatório da ANEEL (2010). Isso pode ser observado para a casca de arroz que teve uma redução de cerca de 3 MJ/kg em relação a fibra de coco, que é a segunda em teor de cinzas e cerca de 4 MJ/kg para as demais biomassas.

O teor de carbono fixo, que tem o cálculo relacionado com o percentual de cinzas e voláteis, manteve-se em torno de 15% com exceção dos materiais fibrosos: bagaço de cana (em torno de 12%) e fibra de coco (em torno de 20%).

3.2.2 Análise do Poder Calorífico Superior (PCS)

Os PCS's das biomassas estão apresentadas na Tabela 3.5a, 3.5b e na Figura 3.33 onde observa-se uma variação entre 15 a 19,5 MJ/kg, sendo pouca influenciado pelos diâmetros médios (máximo 4% entre o maior e menor diâmetro). As biomassas com maior poder energético foram as madeiras e o ouriço da castanha do Brasil, vistas na Figura 3.33b, em uma tendência quase constante.



Figura 3.33: Poder calorífico superior em função do diâmetro médio das partículas

Os dados de poder calorífico superior corroboram com os dados obtidos por Cortez et al. (2008), para a casca de arroz e bagaço de cana, e para fibra de coco e outras madeiras Amazônicas (p. ex: Marupá, da família das gimnospermas, similar à *Tabebuia Cassinoides* Lam) de acordo com Nogueira e Rendeiro (2008),

Para estes autores o valor de PCS variou entre 16 e 20 MJ/kg. Observe na Figura 3.32, que o PCS da casca de arroz é o menor entre as biomassas, e o teor de cinzas (Tabela 3.3a) é o maior em comparação com as demais. A presença de sílica na composição da casca pode ser uma das causas desse elevado teor de cinzas, uma vez que este elemento não sofre degradação térmica com os limites de temperatura utilizados neste trabalho. O elevado teor de cinzas também foi motivo de observação no trabalho de Souza et al. (2007), que considerou que o percentual elevado influencia negativamente valor do PCS dessa biomassa.

Uma observação particular para esse trabalho é que a variação térmica entre os diâmetros não é tão significativa a ponto de justificar a fragmentação da biomassa. O mesmo é observado tanto na análise imediata quanto no poder calorífico superior, ou seja, a variação energética entre a classe de diâmetros analisados não justifica o gasto de energia do processo de fragmentação.

Considerando-se biomassas com características semelhantes às utilizadas nesse trabalho recomenda-se aplicação da biomassa com diâmetros maiores. No entanto, fluidodinamicamente, partículas grandes são problemáticas e causam grandes pistões nos leitos fluidizados.

Com isso são apresentados os resultados obtidos pelas caracterizações física e térmica e de escoabilidade das seis biomassas e de acordo com os métodos apresentados no capítulo 2.

Conclusões

Este trabalho permitiu obter as seguintes conclusões:

Caracterização Física:

 (a) As variações de esfericidade estão diretamente relacionadas à geometria associada e não há uma relação direta entre a variação dos respectivos diâmetros médios.
 Observou-se uma forte relação entre comprimento e diâmetro da partícula para materiais fibrosos.

(b) A massa específica real, possivelmente seja influenciada pelo arranjo e quantidade de partículas alocadas na célula de amostra;

(c) A massa específica do leito aerado é fortemente influenciada pelo arranjo e acomodação inicial das partículas deslocadas por gravidade para dentro de um recipiente cilíndrico. Por isso é importante a padronização do método, visto que o arranjo prévio e altura de queda são fatores de grande relevância.

(d) A realização das micrografias das amostras auxiliou na confirmação da forma geométrica associada à partícula, e possibilitou a identificação das estruturas que compõem cada material. A técnica de criofratura mostrou-se um excelente método de identificação de microestruturas, o que justifica o investimento nessa técnica e aplicação desta técnica para trabalhos futuros;

Caracterização de Escoabilidade

(j) Com relação à escoabilidade, observou-se que as biomassas que tiveram melhor índice de escoabilidade, pela razão de Hausner e índice de Carr, foram o ouriço de castanha do Brasil (RH:1,13 - 1,17, ICC: 12,04 - 14,86), a caixeta (RH: 1,14 - 1,22; ICC: 12,00 -18,16) e a casca de arroz (RH: 1,16 - 1,19; ICC: 14,04 - 15,93). Embora apresentem índices dentro dos limites estabelecidos pela literatura, nenhuma biomassa pode ser considerada de excelente escoabilidade. Para os materiais fibrosos (fibra de coco e bagaço de cana) tiveram menor escoabilidade entre as biomassas. (1) Uma nova classificação foi proposta para definir índices de escoabilidade para as biomassas, referenciando os índices de Hausner, Carr e ângulo de repouso, sendo estas: Classe 1 - boa (RH: 1–1,30; ICC: 5%–15%; AOR:10°–30°), classe 2- razoável (RH: 1,30–1,50; ICC: 15%–25%; AOR: 30°–45°), classe 3- baixa (RH: 1,50–1,80; ICC: 25%-35%; AOR: 45°–55°) e classe 4- difícil (RH: >1,80; ICC: >35%; AOR: >55°).

Caracterização Térmica:

(e) As pequenas variações nas características térmicas das biomassas determinadas pela análise imediata e PCS, não justificam o processo de fragmentação. No entanto, quando se trata de sua utilização em equipamentos como combustores de leito fluidizado, partículas grandes são desfavoráveis a sua fluidodinâmica causando instabilidade do leito.

(f) Pela análise foi detectado: alto teor de materiais voláteis (>80%), baixo teor de carbono fixo (<20%), e baixo teor de cinzas para a maioria das biomassas (2%) com exceção da casca de arroz (16%).

(g) Em relação ao poder calorífico, conclui-se que com exceção da casca de arroz, com poder calorífico (PCS) torno de 15 MJ/kg, as demais biomassas tiveram PCS entre 17 e 19 MJ/kg, que está de acordo com percentuais obtidos por outros autores na caracterização energética de biomassas Amazônicas para fins de aplicação em rotas de combustão e gaseificação de bomassas.

(h) O elevado teor de cinzas interfere no poder calorífico, isso pode ser observado para a casca de arroz que teve uma redução de cerca de 3 MJ/kg em relação a fibra de coco, que é a segunda em teor de cinzas e cerca de 4 MJ/kg para as demais biomassas.

Após algumas conclusões deve-se considerar que a continuidade do estudo deve ser incentivada principalmente pela carência de metodologias direcionada as biomassas de modo que e devem ter uma maior investigação neste contexto.

Quanto à caracterização de escoabilidade de biomassas, embora se trate apenas de uma proposta de classificação, observa-se que estas novas classes com intervalos de diâmetros bem definidos e associados às características físicas e térmicas podem ser ampliadas e/ou melhoradas e se tornar o primeiro passo para que finalmente se consiga caminhar em direção ao conhecimento e padronização de métodos voltados para caracterização e verificação de biomassas para geração de energia.

Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir destas conclusões pode-se apresentar como sugestões para trabalhos posteriores:

- Verificar o comportamento fluidodinâmico (em Leito fluidizado gasoso) e propor um mapeamento destes comportamentos para os intervalos de diâmetros caracterizados;
- Realizar análises termoquímicas e analise elementar para verificação da compatibilidade dos dados térmicos (PCS e PCI) obtidos através de correlações da literatura;
- Realizar testes semelhantes aos deste trabalho para intervalos de diâmetros superiores e inferiores.

- ABDULLAH, E. C.; GELDART, D.. The use of bulk density measurements as flowability indicators. **Powder Technology**, v. 102, p. 151–165, 1999.
- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 8112: Análise imediata de carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986.
- ANEEL: Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2009. Disponível em: < http://aneel.gov.br >. Acesso em 21 de novembro de 2010.
- ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D2040-64 Standard test method for gross calorific value of coal and coke by the adiabatic bomb calorimeter, 1964.
- BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S.. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. Ciência & Engenharia, v. 17, p. 27 - 32, jan. - dez., 2008.
- BRAND, M.A.; DE OLIVEIRA, J.; MARTINS, S.A.; DE OLIVEIRA, L.C.; NEVES, M.D.. Parâmetros de controle da qualidade e preço de biomassa para a geração de energia. Revista ANEEL, Nº 3 – Projetos de geradores, p. 36 – 38, 2010. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/revistap&d.pdf>. Acesso em 02 de fevereiro de 2011.
- CARR. R. L.. Classifying flow properties of solids. Chemical Engineering, v.72 (2), p. 69-72, 1965.
- CHEVANAN, N.; WOMAC, A.; BITRA, V.. Loose-filled and tapped densities of chopped *switchgrass*, corn stover and wheat straw. In: ASABE Annual International Meeting, 2008, Providence, Rhode Island.
- CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da safra brasileira. 2008. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/cana.pdf >. Acesso em: 19 de abril 2010.
- CORTEZ, L.; LORA, E.; GÓMEZ, E.. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ ,B; LORA ,S; GÓMEZ, O. (Org.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p.31 – 62.
- CUNDIFF, J.S., GRISSO, R.D.. Containerized handling to minimize hauling cost of herbaceous biomass. **Biomass & Bioenergy**, v. 32, p. 308–313, 2008.
- CURRAY, J. K. Analysis ofsphericity and roudness of quartz grains. M.S. Tesis in mineralogy. Pensylvania State University, 1954.
- DE LIMA, E. E., **Produção e armazenamento da farinha de Facheiro**. 2006. 49-74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- DIAS, J. A.. Morfometria 2004. Disponível em: < w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks/Sedim/ SedimE _Mfm.pdf >. Acesso em: 15 de agosto de 2011.
- DINIZ, J.. Conversão térmica da casca de arroz à baixa temperatura: Produção de bioóleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente. 2005. 41 100f. Tese (Doutorado em Química) Faculdade de Química, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- DO VALE, A.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C.; NOGUEIRA, M. (2002), "Relações entre e densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do serrado", **Revista Árvore**, Vol. 25, p.89-95.
- FAGURY, R.V.G.. Avaliação de fibras naturais para a fabricação de compósitos: Açaí, coco e juta. 2005. 50 57f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém/PA.
- FEDERARROZ: Federação das Associações de Arrozeiros do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: < http://federarroz.com.br>. Acesso em: 25 de março 2012.

- FINGUERUT, J.; MEIRELES, A. J. A.; GUIRARDELO, R.; COSTA, A. C.. Fermentação, hidrólise e destilação In: CORTEZ ,B; LORA ,S; GÓMEZ, O. (Org.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p.436 – 472.
- GELDART, D.. Estimation of basic particle properties for use in fluid-particle rocess calculations. **Powder Technology**, v. 60, p. 1 13, 1986.
- GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; HASSANPOUR, A.; NWOKE, L.C.; WOUTERS, I.. Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. China Particuology, v. 4, p. 104-107, 2006.
- GÓMEZ, E.O.. Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão. 2002. 22f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- HAUSNER, H. H.. Friction conditions is a mass of metal powders. International Journal of Powder Metallurgy, v.3 (4), p. 7-13, 1967
- JAUBERTHIE, R.; RENDELL,F.; TAMBA, S.; CISSE, I.. Origin of the pozzolanic effect of the Rice rusks. **Construction and building materials**, v 14, p.419 423, 2000.
- KINTO, O.; GALVÃO, L.; GRIMONI, J.. et al.. Energia da gaseificação de biomassa como opção energética de desenvolvimento limpo. In: Enc. Energ. Meio Rural, 4. 2002, São Paulo. Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural. São Paulo. USP, 2003.
- KUMAR, A., SOKHANSANJ, S.. Switchgrass (Panicum vigratum L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model. Bioresource Technology, v. 98, p. 1033–1044, 2007.
- LAM, P.S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; LIM, C.J.; JAYASHANKAR, T.; REZAIRE, G.; NAIMI, L.J.; WOMAC, A.R.. Effect particle size and shape on physical properties of biomass grinds. In: ASABE Annual International Meeting, 2008, Providence, Rhode Island.

- LORA, E.; ANDRADE, R.; SANCHES, C.; et al.. Gaseificação. In: CORTEZ, B; LORA, S; GÓMEZ, O. (Org.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 241 – 332.
- LUENGO, C.; FELFLI, F.; BEZZON, G. **Pirólise e torrefação de biomassa**. In: CORTEZ ,B.; LORA ,S.; GÓMEZ, O.. (Org.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 333 – 352.
- MANDO, M.; ROSENDAHL, L.. On the motion of non-spherical particles at high Reynolds number. **Powder Technology**. v. 202, p. 1 13, 2010.
- MANI, S.; TABIL, L.; SOKHANSANJ, S.. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. **Canadian biosystems engineering**. V. 46, p. 55
- MARTINS, C. R.; JESUS JÚNIOR, L.A.. Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional Panorama 2010, **EMBRAPA**, vol. 164, p. 1-32, 2011.
- MASSARANI, G.; PEÇANHA, R. P., Dimensão característica e formas de partículas, **Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos**, Campinas, 1986, p. 313-312.
- MATOS, R.; TANNOUS, K.. Preparação e caracterização do bagaço de cana de açúcar. XIX Jornada de jovens investigadores AUGM. Ciudad del Este, 2011. p. 1 – 11.
- MIAO, Z.; GRIFT, T. E.; HANSEN, A. C.; TING, K. C.. Energy requirement for Comminution of biomass in relation to particle physical properties. Industrial Crops and Products. v. 33, p. 504 – 513, 2011.
- MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M.. Aplicação das técnicas de ticnometria de gás e de porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira de *E. globulus*. Silva Lusitana. v. 10, p. 207 - 216, 2002.
- NITZKE , J. A.; BIEDRZYCKI, A. ICTA/UFRGS Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. < http://www.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr_divisao.htm> Acesso em 12.01.2012

- NOGUEIRA, M.; RENDEIRO, G.. Caracterização energética da biomassa vegetal. In: BARRETO, E. et al., (eds). Combustão e gaseificação de biomassa sólida. Brasília: MME, 2008. p. 52 – 63.
- OLIVEIRA, C.R.M.; TANNOUS, K.. Fluidodinâmica de Bbiomassa em leito fluidizado gasoso. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química**-COBEQ-IC. 2009.Data de Publicação: 2011. Uberlândia/MG.
- PAIM, E. S.; ORTIZ, L. S.. Pequenas Centrais Biomassa O resíduo como matéria-prima na geração descentralizada de energia. Revista ECOA, 2002. Disponível em: http://www.riosvivos.org.br/Noticia/Pequenas+Centrais+Biomassa+++O+ residuo+como+materia+prima+na+geracao+descentralizada+de+energia/259>. Acesso em 04.08.2011
- RILEY, N. A. "Projection Sphericity", Journal of Sedimentary Research, v. 11, n.2, p. 94-95, 1941.
- SANTOMASO, A.; LAZZARO, P.; CANU, P.. Powder flowability and density ratios: the impact of granules packing. **Chemical Engineering Science**, v. 58, p. 2857 2874, 2003.
- SAUTER, J. Die Grossenbestimmung der in Gemischnebelm von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen, Researc Bulletin VDI, 126, 270 and 1928, 312. In: Biomassa para energia, Cortez L. A. B.; Lora E. E. S.; Olivares-Goméz E.. Editora Unicamp, 2008.
- SEYE, O.; SANTOS, E. C. S.; SOUZA, R. C. R.; SOUZA, C. D. R.; JEFFREYS, M. F.. Caracterização de Biomassa Florestal do Estado do Amazonas para fins Energéticos. In: Congresso Brasileiro de Química, 48. 2008, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos 48º Congresso Brasileiro de Química. Rio de Janeiro. FIRJAN, 2008.
- SOUZA, R. C. R.; SANTOS, E. C. S.; MORAIS, M. R.; SEYE, O.. Carbonização da casca de arroz (*oriza sativa*) para uso energético. In: Congresso Brasileiro de Engenharia

Agrícola, 30. 2007. Bonito. Anais do 36º Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Bonito. CONBEA, 2007.

- Scientific American Supplement, No. 598, junho 18, 1887. Disponível em: http://www.onread.com/fbreader/22538/>. Acesso em: Acesso em 28 de Janeiro de 2012
- TILLMAN, D. A.. The combustion of solid fuels and wastes. San Diego: Academic Press, Inc., 1991.
- WADELL, H. Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles, **Journal of Geology**, v. 43, p. 250–280, 1935.
- WEBB, P.A.; ORR, C., 1997. Analytical methods in fine particle technology. Micromeritics Instrument Corporation, Norcross, GA, USA.