

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE BIOMASSA POLIDISPERSA PELO MÉTODO DE PENEIRAMENTO MECÂNICO

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p102-113/2016>

RODRIGO A. JORDAN¹, RICARDO BALDASSIN JUNIOR², LUIZ A. B. CORTEZ³,
ANAMARI V. A. MOTOMIYA⁴

RESUMO: A biomassa polidispersa tem como uma de suas principais características as variações das dimensões e dos formatos de suas partículas. Os métodos de determinação do diâmetro médio por peneiramento, amplamente utilizados devido a sua relativa simplicidade e baixo custo, quando aplicados a materiais heterogêneos, como a biomassa polidispersa, podem levar a resultados equivocados. Assim, com o objetivo de obter resultados mais precisos, foram avaliados três métodos de determinação do diâmetro médio de partículas de biomassa polidispersa, baseados na técnica de fracionamento por peneiramento mecânico: um de forma analítica (Diâmetro de Sauter) e outros dois por meio de análise gráfica das funções de distribuição das partículas (Função de Densidade de Distribuição Mássica e Função Cumulativa/Aumentativa de Distribuição). O método baseado na análise gráfica da função da distribuição da densidade mássica (FDDM) foi o mais eficiente para a análise do bagaço de cana, pois permitiu identificar as diferentes populações existentes e identificar com clareza as dimensões características, mostrando assim ser uma poderosa ferramenta para a análise granulométrica de biomassas polidispersas.

PALAVRAS-CHAVE: bagaço de cana-de-açúcar, diâmetro médio, distribuição granulométrica, método gráfico, método analítico.

CHARACTERIZATION OF PARTICLE SIZE OF POLYDISPERSED BIOMASS BY MECHANICAL SIEVING

ABSTRACT: Polydispersed biomass has as one of the main features variations in particle dimension and size. Mean diameter determination methods by screening are widely used due to their relative simplicity and low cost. However, when applied for heterogeneous materials such as polydispersed biomass, they can lead to misleading results. Thus, we evaluated three methods for determining mean diameter of polydispersed biomass particles, aiming at most accurate results. The methods are based on size fractionation by mechanical sieving: one analytical (Sauter diameter) and two by graphical analysis of particle distribution functions (Mass Distribution Density - MDD and Cumulative/ Augmentative Distribution - CAD). The method based on graphical analysis of mass distribution density (MDD) was the most efficient for sugarcane bagasse analysis, once it enabled detecting different populations and clearly identifying their respective characteristic dimensions. Therefore, it is a powerful tool for particle size analysis of polydispersed biomass.

KEYWORDS: sugarcane bagasse, mean particle size, particle size distribution, analytical method, graphical method.

INTRODUÇÃO

As biomassas sólidas porosas são caracterizadas por apresentarem grande variedade de partículas, de diferentes geometrias e dimensões, bem como por apresentarem características físico-químicas distintas (CORTEZ et al., 2008). Em se tratando de resíduos agrícolas ou agroindustriais,

¹ Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, Faculdade de Ciências Agrárias da UFGD, Dourados/MS, Fone: (67) 3410-2412, rodrigojordan@ufgd.edu.br

² Eng^o Mecânico, Departamento de Construções Rurais e Ambiente, Campinas/SP, rbaldajr@unicamp.br

³ Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Construções Rurais e Ambiente, Campinas/SP, cortez@feagri.unicamp.br

⁴ Eng^a Agrônoma, Profa. Doutora, Faculdade de Ciências Agrárias da UFGD, Dourados/MS, anamarimotomiya@ufgd.edu.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 19-10-2012

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 16-11-2015

tais aspectos são potencializados, haja vista as possíveis influências das técnicas e das tecnologias empregadas durante a colheita, beneficiamento, processamento ou pré-tratamento dos materiais.

Neste sentido, é de suma importância o devido conhecimento das características físicas e químicas das partículas das biomassas lignocelulósicas, pois o adequado funcionamento e operação de uma dada tecnologia (ou processo de conversão), atrelada às máximas performances e eficiências, estão diretamente relacionados às características da matéria-prima empregada DRIEMEIER et al (2011). Segundo SOSA-ARNAO (2008), em muitas aplicações, o conhecimento dos aspectos físico-geométricos de um material é o primeiro ponto a ser avaliado.

No caso da pirólise rápida em leito fluidizado borbulhante, processo este considerado o mais eficiente na conversão de biomassa sólida em líquido (NO, 2014), o adequado conhecimento das dimensões da biomassa é um fator essencial para o processo, pois impactam significativamente a taxa de degradação do material (perda de massa) e, conseqüentemente, a liberação de vapores e a produção de líquidos (COLLARD & BLIN, 2014), bem como para a fluidização/degradação do material, não permitindo assim a segregação da biomassa no leito e o arraste das frações sólidas pelo agente de fluidização (RASUL & RUDOLPH, 2000). Segundo AKHTAR & AMIN (2012), menores dimensões de partícula propiciam maiores taxas de perda de massa (maximização da transferência de calor), reduzindo assim o tempo de residência dos vapores e dos sólidos no interior do reator, minimizando as ocorrências das reações secundárias, maximizando a produção de líquidos e reduzindo as produções de carvão e de gases/vapores não combustíveis (principalmente, monóxido de carbono e água).

No processo de gaseificação em leito fluidizado borbulhante, PÉREZ et al. (2014) apresentam que o elevado grau de distribuição do tamanho de partículas afeta significativamente o manuseio, influencia o tempo de residência e causa elutriação no leito fluidizado e nos ciclones, reduzindo assim a eficiência do processo.

Ademais, GARCÍA-PÉREZ et al. (2002) apresentam resultados que demonstram a existência de diferenças significativas nas propriedades físico-químicas de biomassas em função de diferentes dimensões de partículas, onde, de modo geral, as frações de menores dimensões apresentam maiores concentrações de cinzas, enquanto as frações de maior dimensão apresentam menores concentrações de cinzas. Os resultados apresentados pelos autores apontaram variações nas concentrações de cinzas superiores a 2.000%, quando avaliadas partículas com dimensões superiores a 4,75 mm e inferiores a 0,25 mm.

A determinação da distribuição de tamanhos de um conglomerado de partículas sólidas granulares polidispersas é um processo, geralmente, realizado em laboratório, podendo ser aplicados, basicamente, três métodos distintos: a microscopia eletrônica, o método físico de sedimentação e a análise por peneiras padronizadas (CORTEZ et al., 2008).

Devido à simplicidade e aos resultados satisfatórios (adequabilidade do método ao tipo de partícula avaliada), o método por peneiramento é o mais empregado na classificação granulométrica de conglomerados de partículas sólidas granulares, dentre as quais a classificação de biomassas de origem vegetal.

Apesar da simplicidade deste método, OJE & UGBOR (1991) enfatizaram a necessidade de cuidados durante a análise, pois os resultados obtidos são altamente influenciados pelos seguintes fatores: tamanho relativo da amostra, tempo do processo, frequência da vibração, equipamento empregado (máquina vibratória), norma e metodologia empregada na análise dos resultados.

Ademais, é necessária atenção especial quando do emprego deste método na caracterização de materiais com alto grau de disparidade de tamanhos (existência de partículas com grandes dimensões e também pó), pois práticas inadequadas podem propiciar equívocos nos resultados (RASUL et al., 1999), principalmente diante do uso de peneiras com aberturas inadequadas. Diante disso, os critérios a serem empregados devem ser criteriosamente planejados e avaliados, pois podem alterar os resultados finais, afetando a frequência de distribuição e, conseqüentemente, a determinação da dimensão característica do material.

Motivado por este contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar três métodos de determinação do diâmetro médio de partículas de biomassa polidispersa, baseado na técnica de fracionamento por peneiramento mecânico de bagaço de cana-de-açúcar moído e seco.

MATERIAL E MÉTODOS

A biomassa utilizada neste trabalho foi o bagaço de cana-de-açúcar obtido diretamente na saída da moenda de uma usina de cana-de-açúcar da região de Campinas-SP. As etapas de pré-tratamento consistiram em: secagem ao sol e moagem em um moedor/desintegrador de grãos (conjunto picador-moedor de facas e martelo, com controle de granulometria via peneira de malha circular de 5 mm de abertura).

O processo de peneiramento foi realizado em uma máquina vibratória modelo “T” e peneiras da série Tyler “A” (formato circular, em aço inox e 2” de altura), ambas da marca Prodest. Na pesagem do material, foi empregada balança digital com resolução de 0,01 g e capacidade de pesagem máxima de 3.100 g.

O tempo de peneiramento foi de 10 minutos para todos os ensaios realizados. A frequência de vibração empregada foi correspondente à posição oito do potenciômetro da máquina vibratória. Foi empregado um conjunto de peneiras composto por sete peneiras, sendo a inferior sem perfuração (fundo cego). Após cada peneiramento, o material retido em cada peneira foi pesado, e os valores, registrados. As definições do tempo dos ensaios e da frequência de vibração foram definidas em função dos resultados obtidos em testes preliminares.

Foram realizados um total de dois tratamentos, em que: no primeiro tratamento (Tratamento 1), o processo de peneiramento foi conduzido sem separação granulométrica prévia, e, no segundo tratamento (Tratamento 2), o processo de peneiramento foi antecedido por um processo de pré-separação granulométrica do bagaço (partículas com dimensões inferiores e superiores a 0,85 mm).

No “Tratamento 1”, o bagaço de cana foi disposto sobre uma lona plástica, visando a obter uma homogeneização do material. Após devidamente espalhado, foram coletadas duas amostras (manualmente), sendo posteriormente dispostas sobre uma mesa. Segundo ilustrado na Figura 1, as amostras foram organizadas na forma de dois discos distintos e divididas (de forma visual), com o uso de uma régua, em quatro frações semelhantes, denominadas de 1-2-3-4 e 5-6-7-8. A partir destas denominações, foram formadas quatro subamostras, denominadas de: Repetição 1 (frações 1-4), Repetição 2 (frações 2-3), Repetição 3 (frações 5-8) e Repetições 4 (frações 6-7). As três primeiras frações foram empregadas nos experimentos de separação e consistiram nas seguintes quantidades: Repetição 1 (71,08 g), Repetição 2 (78,19 g) e Repetição 3 (70,95 g). A quarta fração (6-7) foi descartada, em vista de se ter optado pelas realizações de apenas 3 repetições do ensaio. Os carregamentos iniciais de materiais nas peneiras superiores (“Peneira 1”) atingiram de 70 % a 80 % da altura das peneiras (3,56 cm e 4,06 cm), sendo tais valores definidos em função dos resultados obtidos em testes preliminares.

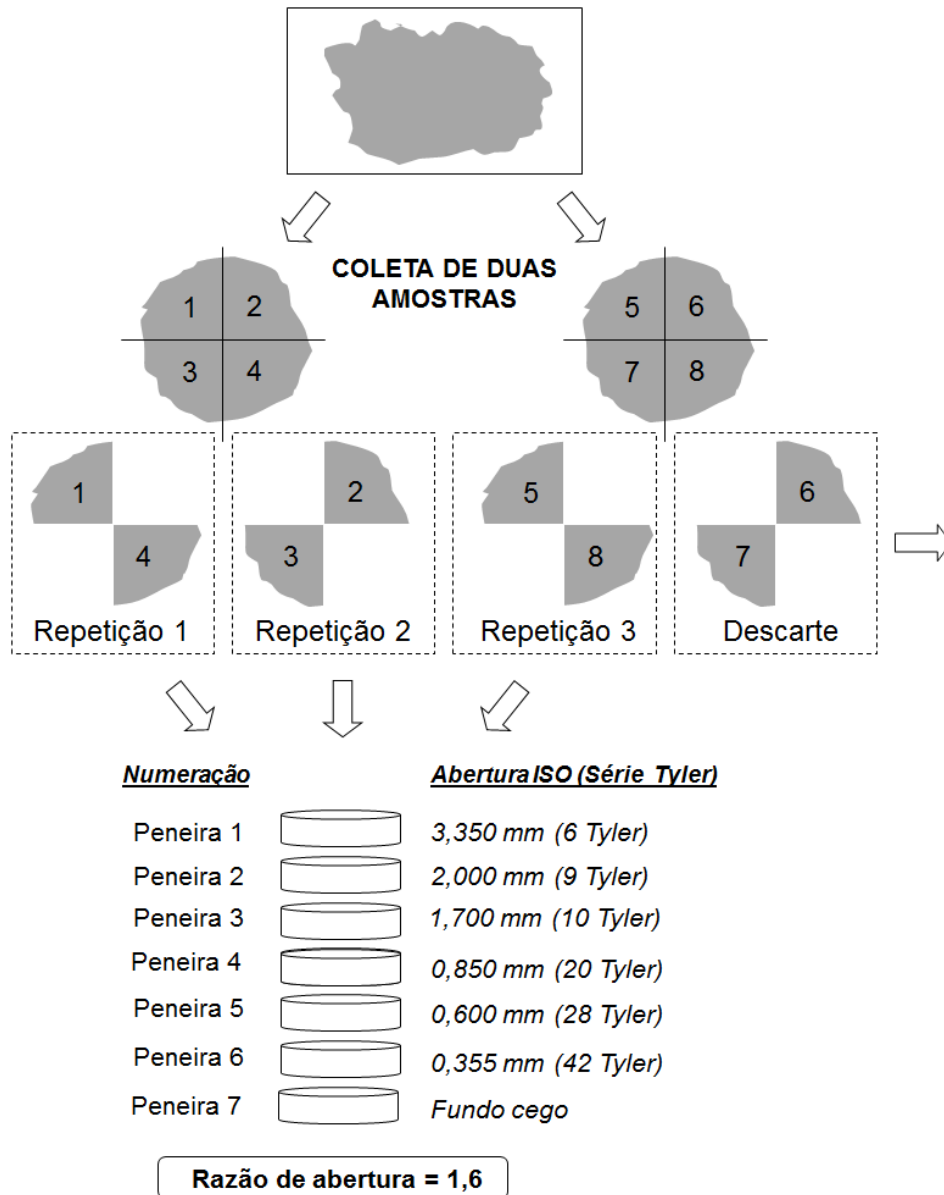


FIGURA 1. Tratamento das amostras para o primeiro ensaio (Tratamento 1). **Sample treatment for the first test (Treatment 1).**

Para a aplicação dos métodos de determinação do diâmetro médio, foram empregados os seguintes parâmetros:

- Fração Mássica (Δx_i): razão entre a “massa retida na peneira” e a “massa total da amostra”;
- Diâmetro médio (\overline{Dp}_i): média aritmética da abertura da referida peneira e a imediatamente superior;
- Fração Peneirada (x_i): fração de material que efetivamente “passou” pela referida peneira;
- Fração Retida (y_i): fração de material que efetivamente ficou retida na referida peneira;
- Razão $\Delta x_i / \overline{Dp}_i$: razão entre a Fração Mássica e o Diâmetro Médio.

Na Tabela 1, apresentam-se as relações empregadas na determinação do diâmetro médio do conglomerado de partículas.

TABELA 1. Definições dos cálculos dos parâmetros. **Definition of parameter calculations.**

D_{p_i} (mm)	Massa Pesada (m_i) (g)	Fração Mássica (Δx_i) (-)	Diâmetro Médio (\overline{D}_{p_i}) (mm)	Fração Peneirada (x_i) (-)	Fração Retida (y_i) (-)	$\Delta x_i / \overline{D}_{p_i}$ (-)
D_1	m_1	m_1/m_T	D_1	$1 - \Delta x_1$	$1 - x_1$	$\Delta x_1 / \overline{D}_{p_1}$
D_2	m_2	m_2/m_T	$(D_2 + D_1)/2$	$x_1 - \Delta x_2$	$1 - x_2$	$\Delta x_2 / \overline{D}_{p_2}$
D_3	m_3	m_3/m_T	$(D_3 + D_2)/2$	$x_2 - \Delta x_3$	$1 - x_3$	$\Delta x_3 / \overline{D}_{p_3}$
D_4	m_4	m_4/m_T	$(D_4 + D_3)/2$	$x_3 - \Delta x_4$	$1 - x_4$	$\Delta x_4 / \overline{D}_{p_4}$
D_5	m_5	m_5/m_T	$(D_5 + D_4)/2$	$x_4 - \Delta x_5$	$1 - x_5$	$\Delta x_5 / \overline{D}_{p_5}$
D_6	m_6	m_6/m_T	$(D_6 + D_5)/2$	$x_5 - \Delta x_6$	$1 - x_6$	$\Delta x_6 / \overline{D}_{p_6}$
D_7	m_7	m_7/m_T	$(D_7 + D_6)/2$	$x_6 - \Delta x_7$	$1 - x_7$	$\Delta x_7 / \overline{D}_{p_7}$
-	$m_i = \sum m_i$	$\sum \Delta x_i = 1$	-	-	-	$\Delta x_i / \overline{D}_{p_i}$

Em vista dos parâmetros apresentados na Tabela 1, foram definidos os diâmetros médios pelo método analítico (Diâmetro de Sauter) e pelos métodos gráficos via Função de Densidade de Distribuição Mássica (FDDM) e via Função Cumulativa/Aumentativa de Distribuição (FCAD).

O Diâmetro de Sauter (D_s) foi determinado através da [eq. (1)] (KUNII & LEVENSPIEL, 1991):

$$D_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^7 (\Delta X_i / \overline{D}_{p_i})} \quad (1)$$

Na aplicação do método gráfico via Função de Densidade de Distribuição Mássica, os valores de Δx_i (Fração Mássica) foram dispostos em um gráfico, em função de \overline{D}_{p_i} (Diâmetro médio), sendo o tamanho característico da partícula definido como o ponto onde a derivada da curva apresenta o valor máximo (Figura 2a).

Na aplicação do método gráfico via Função Cumulativa/Aumentativa de Distribuição, os valores de x_i (Fração Peneirada) e y_i (Fração Retida) foram dispostos em função de \overline{D}_{p_i} (Diâmetro médio), e o tamanho característico da partícula foi definido como sendo o valor de \overline{D}_{p_i} observado na interceptação das curvas x_i e y_i (Figura 2b).

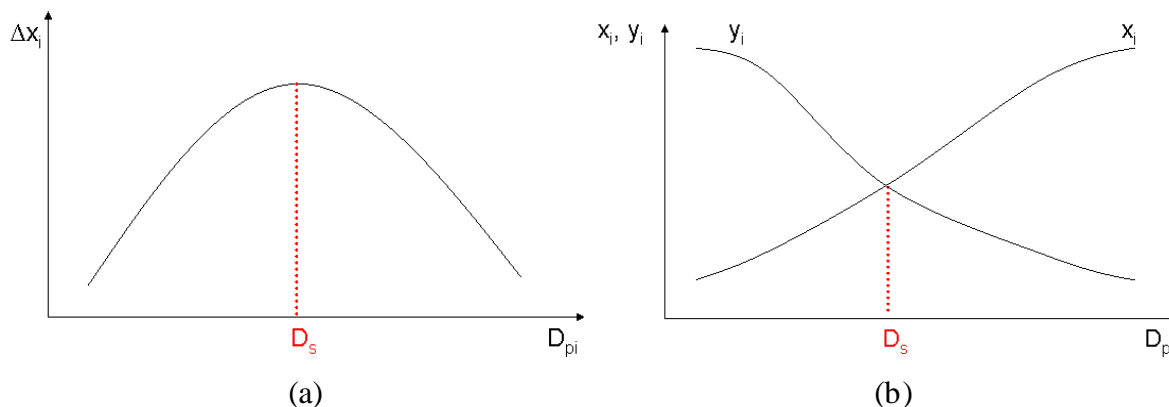


FIGURA 2. Determinação do diâmetro médio pelo método gráfico: (a) Função de Densidade de Distribuição – FDDM, (b) Função Cumulativa/Aumentativa de Distribuição – FCAD.
Mean diameter determination by graphical method: (a) Mass Distribution Density – MDD, (b) Cumulative/ Augmentative Distribution – CAD.

Como a análise pelo método gráfico via Função de Densidade de Distribuição Mássica (FDDM) do primeiro tratamento demonstrou que o bagaço de cana apresentava comportamento bimodal para curva Δx_i versus D_{pi} , evidenciando assim a existência de mais de uma população dentro da mesma amostra de bagaço, no segundo tratamento do bagaço de cana (Tratamento 2), optou-se por um fracionamento preliminar da amostra, conforme ilustrado na Figura 3. Para este procedimento, foi coletada uma amostra de 477,65 g de bagaço e, posteriormente, submetido à separação por meio de uma peneira de 0,850 mm de abertura, obtendo assim duas amostras (frações com dimensões inferiores a 0,850 mm e frações com dimensões superiores a 0,850 mm). Posteriormente, as frações foram divididas em duas partes iguais (visualmente), organizadas na forma de discos e divididas em oito frações iguais, denominadas de 1-2-3-4 e 5-6-7-8. A partir destas, foram geradas quatro subamostras (amostras empregadas nos ensaios), as quais receberam as seguintes denominações: Repetição 1 (fração 1-4), Repetição 2 (fração 2-3), Repetição 3 (fração 5-8) e Repetição 4 (fração 6-7).

Para as frações com dimensões inferiores a 0,85 mm, as massas de bagaço presentes em cada repetição foram: Repetição 1 (82,24 g), Repetição 2 (82,25 g), Repetição 3 (77,63 g) e Repetição 4 (87,34 g). Para as frações com dimensões superiores a 0,85 mm, as massas foram: Repetição 1 (37,54 g), Repetição 2 (40,90 g), Repetição 3 (37,38 g) e Repetição 4 (32,37 g).

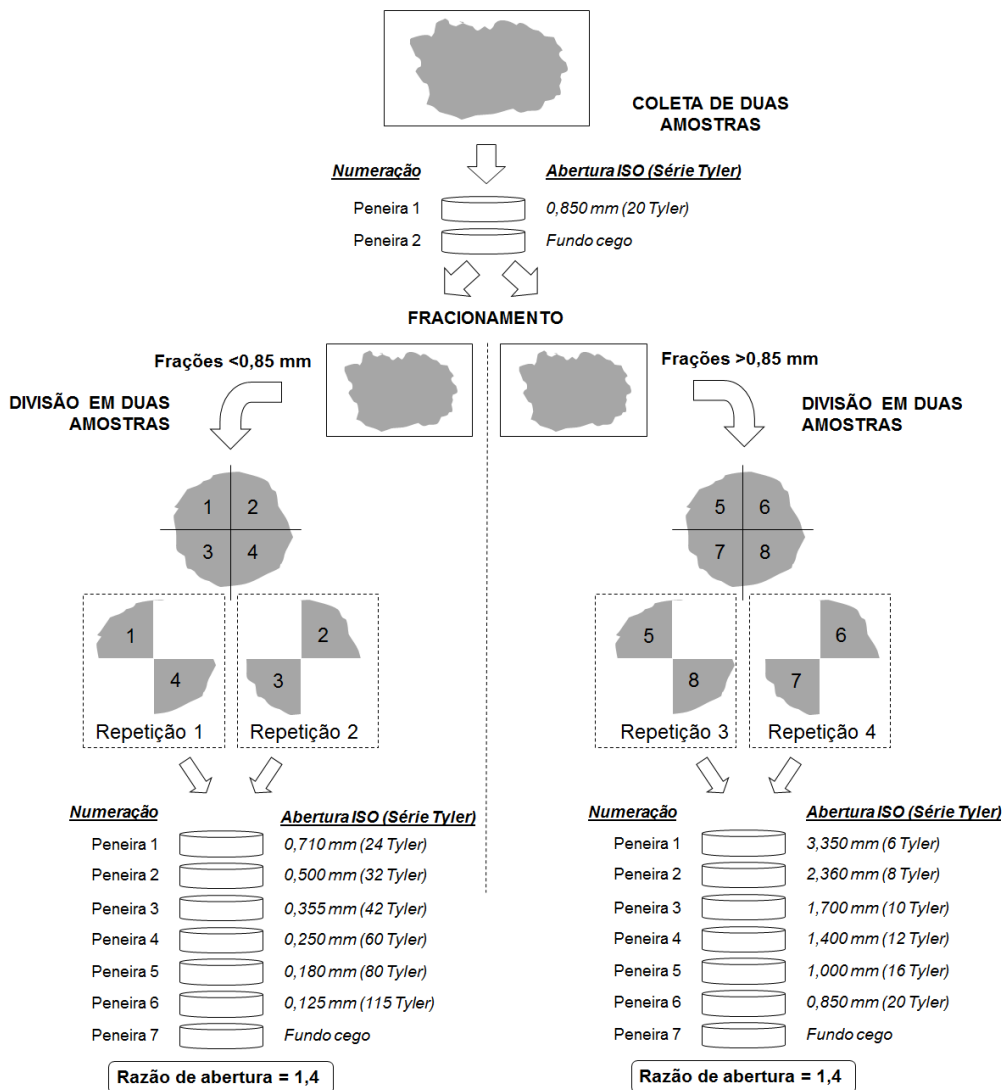


FIGURA 3. Tratamento das amostras no segundo ensaio (Tratamento 2). **Sample treatment for the second test (Treatment 2).**

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes de peneiramento foram conduzidos de forma satisfatória, e foram observadas adequadas separações das frações para o tempo de processo considerado (10 minutos) e para a frequência de vibração empregada (posição 8 do potenciômetro do equipamento).

Em vista dos resultados obtidos no “Tratamento 1”, apresentam-se na Figura 4a as curvas para a determinação do diâmetro médio pelo método gráfico da Função Cumulativa/Aumentativa de Distribuição (FCAD) e na Figura 4b a determinação do diâmetro médio pelo método gráfico da Função de Densidade de Distribuição Mássica (FDDM).

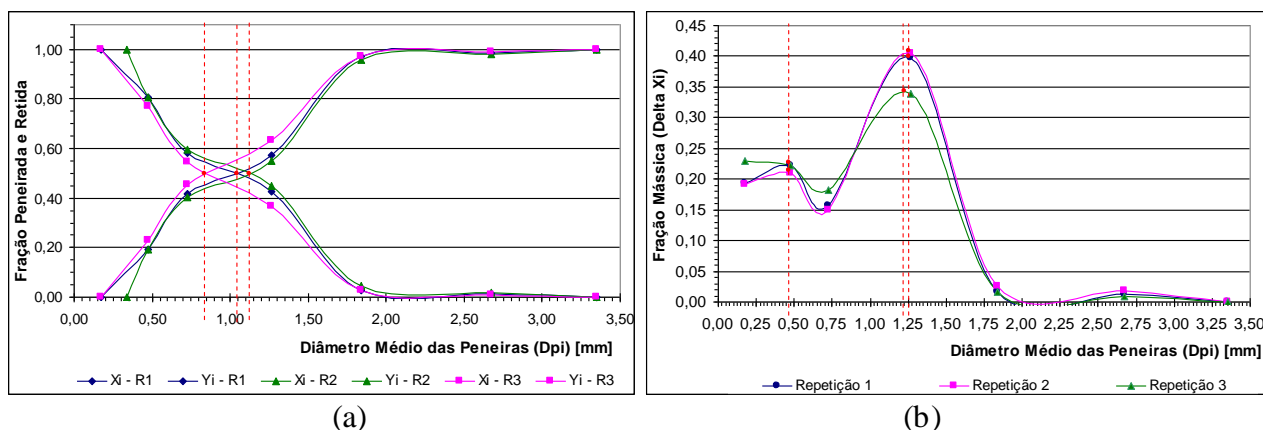


FIGURA 4. Representações gráficas médias do diâmetro: (a) Função Cumulativa/Aumentativa de Distribuição, (b) Função de Densidade de Distribuição Mássica. **Mean diameter graphic representation: (a) Cumulative/ Augmentative Distribution (b), Mass Distribution Density.**

A análise pelo método gráfico da FCAD (Figura 4a) apontou para a existência de uma única população com diâmetro médio de 0,93 mm. Por meio do método analítico, o diâmetro médio (D_s) encontrado foi de 1,00 mm, convergindo assim para o valor encontrado pelo FCAD.

Entretanto, na Figura 4b, devido à grande heterogeneidade do bagaço de cana, foi observada uma distribuição bimodal, evidenciando assim a existência de duas populações distintas e representativas no bagaço de cana: uma composta basicamente por pó, com diâmetro médio da ordem de 0,48 mm; e outra composta por fibras, com diâmetro médio da ordem de 1,24 mm. Tais discrepâncias nos valores observados podem comprometer, significativamente, o desempenho e o dimensionamento de processos, principalmente nos casos em que o comportamento fluidodinâmico e a taxa de degradação térmica das partículas são fatores essenciais, como no caso dos processos conduzidos em reatores de leito fluidizado (NO, 2014; COLLARD & BLIN, 2014; RASUL & RUDOLPH, 2000; AKHTAR & AMIN, 2012).

Diante dos valores observados, são apresentados na Tabela 2 os valores médios dos diâmetros das partículas obtidos para a separação do bagaço de cana, segundo os diferentes métodos empregados.

TABELA 2. Média e erro-padrão da média do diâmetro médio do bagaço de cana moído, segundo o método analítico, FDDM e FCAD (Tratamento 1). **Mean and standard error of mean diameter of crushed sugarcane bagasse through analytical, MDD and CAD methods (Treatment 1).**

Método	Analítico	FDDM-1	FDDM-2	FCAD	Erro-padrão
Média	1,00 b	0,48c	1,24a	1,02b	0,16

CV:8.2%; DMS: 0.2007. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Analisando a geometria de amostras de bagaço de cana e deparando-se com a mesma situação, SOSA-ARNAO (2008) relatou que o valor do diâmetro médio obtido de forma analítica, quando aplicada a análise de separação por peneiras, não é representativo, enquanto os resultados da análise FDDM obtidos convergem para os resultados reportados por PONCEET et al. (1983), RASULET et al. (1999), NEBRA (1985), BERNHARDT (1993) e GÓMES (1996), onde os trabalhos desenvolvidos demonstraram a existência de duas ou três populações distintas de diâmetros característicos de partícula nas biomassas avaliadas.

Em vista das identificações de duas populações distintas de bagaço de cana (diâmetros médios), optou-se pelo fracionamento do bagaço em duas amostras (Tratamento 2). Para este processo, a análise gráfica via FDDM foi empregada como ferramenta de seleção da abertura da

peneira a ser empregada no fracionamento do bagaço de cana. Com base nos dados apresentados no gráfico da Figura 4b, optou-se pelo emprego da peneira com abertura de 0,85 mm, conforme metodologia apresentada na Figura 2.

No processo de fracionamento da amostra de 477,65 g de bagaço, a fração com granulometria inferior a 0,85 mm representou uma fração mássica de 68,97%, enquanto a fração com granulometria superior a 0,85 mm representou os 31,03% restantes, demonstrando assim a predominância de fibras longas no bagaço. Tendo em vista que altas concentrações de cinzas são encontradas nas frações de menor dimensão de bagaço (até 27,7 % em base mássica), o não emprego destas frações pode propiciar melhorias no desempenho de processos (maiores rendimentos de conversão), como, por exemplo, no processo de pirólise a vácuo, conforme sugerido por GARCÍA-PÉREZ et al. (2002). Entretanto, segundo BAHURUDEEN et al. (2015), ALMEIDA et al., (2015) e LOH et al. (2013), o emprego das cinzas de bagaço de cana (resíduos da combustão) como compostos cimentícios e como agregado em argamassas se apresenta como uma alternativa para a construção civil, bem como para um adequado descarte e tratamento dos resíduos gerados nas caldeiras das usinas brasileiras. Tendo em vista que são produzidos 6,2 kg de cinzas por 260 kg de bagaço (FIESP/CIESP, 2001) e que o consumo de bagaço nas usinas, em 2013, foi da ordem 138 milhões de toneladas (EPE, 2014), estima-se que cerca de 3,3 milhões de toneladas de cinzas de bagaço podem ter sido produzidos em 2013 nas caldeiras das usinas brasileiras.

Em vista do fracionamento obtido, nas Figuras 6 e 7 são apresentados os comportamentos das curvas com os resultados dos peneiramentos das frações de bagaço, segundo os métodos FCAD e FDDM, respectivamente, e na Tabela 3, os resultados dos diâmetros médios obtidos através do método analítico e dos métodos gráficos.

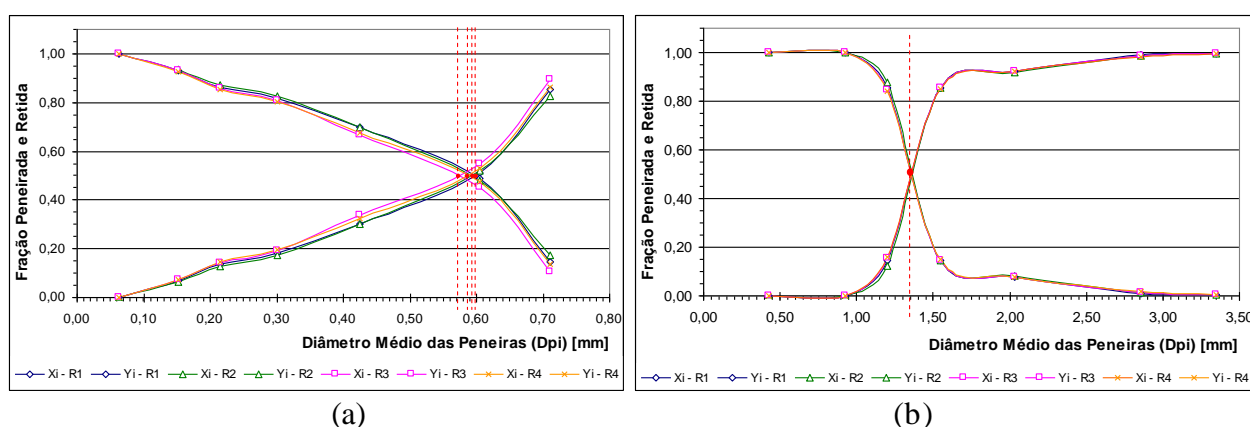


FIGURA 6. Função Cumulativa/Aumentativa de Distribuição: (a) frações < 0,85 mm, (b) frações > 0,85 mm. **Cumulative/Augmentative Distribution: (a) fractions < 0.85 mm (b), fractions > 0.85 mm.**

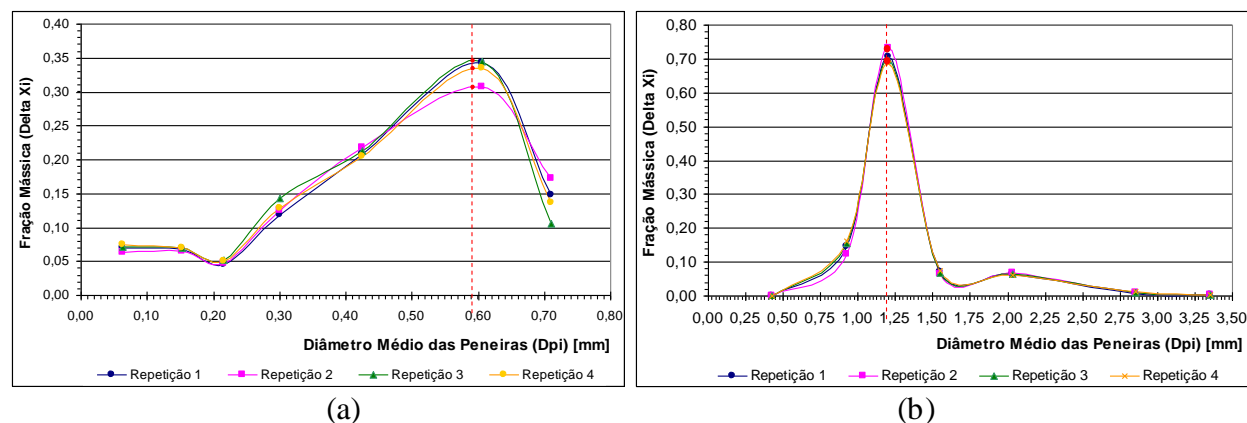


FIGURA 7. Função de Densidade de Distribuição de Massa: (a) frações < 0,85 mm, (b) frações > 0,85 mm. **Mass Distribution Density: (a) fraction <0.85 mm, (b) fractions > 0.85 mm.**

Após o fracionamento do bagaço, observa-se, nas Figuras 6 e 7, que ambos os métodos gráficos empregados (FCAD e FDDM) confirmaram as existências de dois diâmetros característicos, diferentemente do manifestado na Figura 4 (sem fracionamento inicial). Ademais, foram observadas as convergências dos valores em ambos os métodos gráficos para os diâmetros característicos de 0,59 mm (frações < 0,85 mm) e entre 1,24 mm e 1,35 mm (frações > 0,85 mm).

TABELA 3. Média e erro-padrão da média do diâmetro médio do bagaço de cana moído segundo método analítico, FDDM e FCAD (Tratamento 2). **Mean and standard error of mean diameter of crushed sugarcane bagasse by analytical, MDD and CAD methods (Treatment 2).**

Fração	Analítico	FDDM	FCAD	Erro-padrão
< 0,85 mm ¹	0,43b	0,59a	0,59a	0,02
> 0,85 mm ²	1,21c	1,24b	1,35a	0,02

1: CV = 1,62%; DMS = 0,017. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade;
2: CV = 0,23%; DMS = 0,0057. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Em vista dos dados apresentados na Tabela 3, diferentemente dos apresentados na Tabela 2 (sem fracionamento inicial), ficou evidenciado que, mesmo que a análise estatística tenha apontado para a existência de diferenças entre as médias, o fracionamento da amostra em duas frações (separação das duas populações identificadas) possibilitou as convergências dos valores numéricos obtidos nos três métodos para um intervalo comum de valores, uma vez que, para a fração com dimensões inferiores a 0,85 mm (31,03 % da quantidade mássica de bagaço), a dimensão característica variou entre 0,43 mm e 0,59 mm, enquanto para a fração com dimensões superiores a 0,85 mm (68,97 % da quantidade mássica de bagaço) as dimensões características variaram entre 1,21 mm e 1,35 mm.

Neste contexto, RASUL et al. (1999) manifestaram que a separação do bagaço por peneiramento é uma técnica pouco confiável, pelo fato de este tipo de técnica não responder adequadamente quando aplicado a materiais com grande disparidade de dimensões, sendo, assim, mais recomendada para classificações de materiais na forma de pó. Entretanto, diferentemente do apontado pelos autores, ficou evidenciado nos experimentos realizados que a não confiabilidade, ou a ineficiência da técnica de peneiramento de materiais com alto grau de disparidade de dimensões, pode não estar diretamente relacionada ao método de classificação por peneiramento, mas, em grande parte, pela metodologia empregada na condução dos ensaios de peneiramento e no tratamento dado aos resultados obtidos.

Em vista dos desvios obtidos junto às médias, ficou evidente que os métodos para a determinação do tamanho característico não podem ser aplicados separadamente, principalmente nos casos em que se encontram presentes duas (ou mais) populações distintas de diâmetros

características no mesmo material. Tal aspecto pode ser evidenciado em vista dos resultados apresentados na Tabela 2, em que os resultados obtidos pelo método analítico e pelo método gráfico via FCAD (Figura 4a) menosprezaram a existência de uma segunda dimensão característica. Esta inconsistência está manifestada pelo método gráfico via FDDM (Figura 4b). Quanto às imprecisões dos métodos empregados, no caso da análise do peneiramento sem fracionamento (Tabela 2), os desvios nos valores obtidos são potencializados com convergências dos valores obtidos através dos métodos DS e FCAD e divergência dos valores obtidos pelo método FDDM, fato este justificado pelas incorporações dos dois diâmetros característicos em um único valor pelos métodos DS e FCAD.

Desta forma, diante das limitações e características do processo de classificação via peneiras padronizadas, ficou evidenciado que as conduções de ensaios de granulometria de materiais com alto grau de polimorfismo (disparidade de tamanhos) demandam atenção especial quanto às metodologias empregadas (processo de separação e análise dos resultados), uma vez que as conduções de técnicas inapropriadas podem acarretar em resultados não fidedignos, podendo assim comprometer o funcionamento de equipamentos e os rendimentos dos processos de conversão considerados.

CONCLUSÕES

As devidas identificações das dimensões características de biomassas polidispersas são de extrema relevância frente aos seus usos como matérias-primas em diversos processos, principalmente junto aos processos termoquímicos e biológicos. O método de caracterização granulométrica por peneiramento mecânico apresenta-se como uma técnica largamente aplicada, de baixo custo e de relativa simplicidade; entretanto, carece de atenção especial quanto à metodologia empregada no processo de separação e na análise dos resultados.

Em vista dos métodos empregados (analítica, FCAD e FDDM), no caso do bagaço de cana moído, os melhores resultados foram obtidos após o fracionamento do material em duas frações, onde em cada fração continha apenas uma população, possibilitando assim as convergências dos valores dos diâmetros médios obtidos pelos três diferentes métodos. A determinação da abertura da peneira empregada para o fracionamento da amostra pode ser realizada através da Curva de Distribuição de Densidade (método FDDM) sem grande dificuldade.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, J.; AMIN, N.S. A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Colorado, v.16, n.7, p.5101-5109, 2012. doi:10.1016/j.rser.2012.05.033
- ALMEIDA, F.C.R.; SALES, A.; MORETTI, J.P.; MENDESP. C.D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v.82, p.31-38, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039
- BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; GOKUL DEV, V.; SANTHANAM, M. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v.59, p.77-88, 2015. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004
- BERNHARDT, W.H. Shape factors of bagasse particles. **Proceedings of The South African Technologists Association**, Mount Edgecombe, p.181-184; 1993.
- COLLARD, F.X.; BLIN, J. A review on pyrolysis of biomass constituents: mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Colorado, v.38, p.594-608, 2014. doi:10.1016/j.rser.2014.06.013

- CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; OLIVARES GÓMEZ, E. **Caracterização da Biomassa**. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; OLIVARES GÓMEZ, E. Biomassa para energia. Campinas: Unicamp, 2008. p.31-60.
- DRIEMEIER, C.D.; OLIVEIRA, M.M.; MENDES, F.M.; GÓMEZ, E.O. Characterization of sugarcane bagasse powders. **Powder Technology**, Ohio, v.214, n.1, p.111–116, 2011. doi:10.1016/j.powtec.2011.07.043
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Brazilian energy balance 2014: year 2013**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2014.
- FIESP/CIESP - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa**. São Paulo, 2001.
- GARCÍA-PÉREZ, M.; CHAALA, A.; ROY, C. Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Ravenna, v.65, n.2, p.111–136, 2002. doi:10.1016/S0165-2370(01)00184-X
- GÓMES, E.O. **Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar**. 1996. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 1996.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**, 2nd ed. Boston: Butterworth, 1991.
- LOH, Y.R.; SUJAN, D; RAHMAN, M.E.; DAS C.A. Sugarcane bagasse - The future composite material: A literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, Michigan, v.75, p.14–22, 2013. doi:10.1016/j.resconrec.2013.03.002
- NEBRA, S.A. **Secagem pneumática de bagaço de cana**. 1985. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 1985.
- NO, S. Application of bio-oils from lignocellulosic biomass to transportation, heat and power generation - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Colorado, v.40, p.1108–1125, 2014. doi:10.1016/j.rser.2014.07.127
- OJE, K.; UGBOR, E.C. Some physical properties of oil bean seed. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.50, p.305-313, 1991.
- PÉREZ, N.P.; MACHIN, E.B.; PEDROSO, D.T.; ANTUNES, J.S.; SILVEIRA, J.L. Fluid-dynamic assessment of sugarcane bagasse to use as feedstock in bubbling fluidized bed gasifiers. **Applied Thermal Engineering**, Kowloon, v.73, n.1, p.236–242, 2014. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.07.048
- PONCE, N.; FRIDEMAN, P.; LEAL, D. Geometric properties and density of bagasse particles. **International Sugar Journal**, London, v.85, n.1018, p.291-295, 1983.
- RASUL, M.G.; RUDOLPH, V. Fluidized bed combustion of Australian bagasse. **Fuel**, Nottingham, v.79, p.123-130, 2000. doi:10.1016/S0016-2361(99)00144-1
- RASUL, M.G.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M. Physical properties of bagasse. **Fuel**, Nottingham, v.78, p.905-910, 1999. doi:10.1016/S0016-2361(99)00011-3
- SOSA-ARNAO, J.H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço – estudo do sistema de recuperação e energia**. 2008. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.