

CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA E ESTUDO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Marcelo Theotônio Teixeira Rios

Silvia Azucena Nebra

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Cx. Ps. 6122, CEP: 13083-970, Campinas, SP, Brasil. E-mail: jefferso@fem.unicamp.br

Resumo

Desenvolveram-se neste trabalho, o projeto de um sistema de alimentação para o bagaço de cana e a caracterização deste material. O sistema de alimentação era composto por um silo com tremonha em cunha retangular e uma calha vibratória inclinada. Com a finalidade de realizar testes de dimensões, confeccionaram-se vários protótipos do silo, mantendo-se constante o ângulo de inclinação da tremonha e variando-se as dimensões da boca da mesma. A caracterização foi constituída de medidas de densidade aparente, ângulo de escoamento do material e análise granulométrica em função do teor de umidade do mesmo e de um estudo de distribuição de fibras e pó em função do diâmetro médio obtido da análise granulométrica.

Palavras-chave: silo, bagaço de cana, alimentação, fibra, caracterização.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de biomassa apresenta-se como uma importante alternativa para geração de energia elétrica em relação a combustíveis fósseis. O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de biomassa, com destaque para o bagaço de cana. Devido à utilização de cana de açúcar para a produção de açúcar e álcool combustível, obtém-se, neste país, grande quantidade deste combustível, que por ser resíduo de processo, apresenta baixo custo.

Sousa-Santos (1997), estudando a gaseificação de bagaço de cana em leito fluidizado pressurizado, observou que a eficiência ótima do processo ocorria com o bagaço com teor de umidade entre 20 e 30% em base úmida (b.u.). Paiva Souza et al.(1998) estudaram a economia energética obtida na utilização de gás de escape de caldeiras de vapor para a secagem de bagaço. Este produto sai das moendas a 50% de umidade (b.u.).

Gaha et al. (1998) desenvolveram um sistema de alimentação de bagaço de cana para um gaseificador ciclônico. Este sistema era composto de um silo de área de seção transversal quadrada sem tremonha com capacidade de 0,4 m³ de volume com 4 roscas transportadoras na parte inferior. Nos primeiros testes, o bagaço foi alimentado em sua forma usual, observando-se formação de arco coesivo e flutuação na vazão de saída do material. A solução encontrada pelos autores foi peletizar e moer o bagaço, transformando-o em um material de dimensões menores, mais homogêneas e de maior densidade aparente, embora resultasse em maior gasto energético, e maior custo.

Neiva (1998a) mediu várias propriedades do bagaço, necessárias ao dimensionamento de um silo. Seu sistema de alimentação era composto por um silo constituído somente por uma tremonha de 2m³ e por um conjunto de 6 roscas dosadoras paralelas. Neste trabalho, Neiva

comenta que a partir de um teor de umidade de 20% (b.u.) para mais, a alimentação do bagaço começa a se tornar problemática. Em outro trabalho (Neiva, 1998b), este autor afirma que houve formação de arco coesivo em seu sistema e que provavelmente haveria escoamento por gravidade sem formação de arco se o silo tivesse o fundo totalmente aberto. Afirma, ainda, que a lenta retirada do material desenvolve fenômenos na interface silo-rosca que provocam a formação de arco.

Bernhardt (1999) estudou a formação de arco em silos de bagaço de cana. Propôs um modelo para predição de dimensões mínimas para a altura e distância entre as paredes de silos baseado em testes de cisalhamento, densidade aparente e razão entre fibras e pó do bagaço. Seu modelo foi baseado em silos verticais sem tremonha.

O bagaço de cana pode apresentar diferenças em sua composição em função da qualidade da cana e do processamento (Bernhardt, 1999). Independentemente destes fatores, este produto constitui-se basicamente de pó e de grande percentagem de fibras, como apresentado por Nebra e Macedo (1988).

O presente trabalho faz parte de um projeto de estudo da secagem de bagaço de cana em um secador ciclônico. Seu objetivo é dimensionar um sistema de alimentação do bagaço para este secador e fazer a caracterização deste material. Para dimensionar o sistema de alimentação, confeccionaram-se vários protótipos com diferentes dimensões de boca da tremonha. A caracterização foi constituída de medidas de densidade aparente, análise granulométrica e ângulo de escoamento do material, em função do teor de umidade do mesmo e de um estudo de distribuição de fibras e pó em função do diâmetro médio obtido da análise granulométrica.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização do Bagaço de Cana

Os testes de caracterização e de dimensionamento do sistema de alimentação foram realizados com bagaço de cana cedido pela Usina Ester situada na cidade de Cosmópolis, SP. A partir de uma amostra deste bagaço, com teor de umidade de 2,76% (b.u.) em equilíbrio com a umidade do ar, foi feito um estudo para definição do conjunto de peneiras que apresentasse a distribuição mais uniforme. Depois, variou-se o tempo de peneiramento a fim de obter-se um tempo ideal em que não houvesse variações nas massas obtidas em cada peneira.

A densidade aparente do material foi determinada utilizando o método de pesagens sucessivas com um picnômetro de 0,050 l. Como fluido de trabalho, foi escolhido o tolueno devido à sua baixa tendência a penetrar os poros no interior das partículas. Para esta determinação, procurou-se utilizar amostras contendo todos os tipos e tamanhos de partículas. Uma descrição mais detalhada deste método encontra-se em Mohsenin (1986).

Outra característica medida foi o ângulo de escoamento do material. Isto foi feito colocando-se uma quantidade do mesmo sobre uma superfície horizontal de papelão revestida com filme vinílico e inclinando esta superfície até obtenção de escoamento.

As determinações acima descritas foram realizadas para diferentes teores de umidade do material para que se avaliasse a influência desta variável. A umidade foi determinada inicialmente em estufa e depois comparada com a obtida em uma balança marca OHAUS modelo MB200 com monitoramento de perda de umidade. A diferença apresentada entre os dois aparelhos foi de 0,8 % em base úmida, o que levou a optar pelo uso desta balança nas demais determinações, por apresentar menor tempo de processamento. A temperatura utilizada (105°C) foi baseada na norma NBR 7993 referente à secagem de madeira reduzida a serragem, por não se ter norma específica para secagem deste material.

Fez-se, ainda, uma avaliação do percentual de fibras obtidos em cada peneira, por separação manual das frações. Considerou-se que as partículas do material fossem constituídas de fibras, que apresentavam geometria próxima a de um cilindro, e pó, de dimensões semelhantes entre si. Utilizou-se também nesta determinação dados de Nebra e Macedo (1988), que fizeram o mesmo estudo com outras medidas de diâmetro médio.

2.2 Dimensionamento do Sistema Silo-Transportador

Primeiramente fez-se um experimento com o material com teor de umidade igual a 45,5% (b.u.) em um sistema previamente existente composto por um silo com tremonha piramidal de base quadrada e ângulo de inclinação da tremonha com a vertical (α) igual a 27° e uma calha vibratória horizontal (sistema 1).

Repetiu-se o experimento no mesmo sistema utilizando-se pequenos cilindros de resina plástica, de $2,43 \times 10^{-3}$ m de diâmetro e $2,99 \times 10^{-3}$ m de comprimento a fim de comparar o comportamento dos dois sólidos.

Posteriormente, fez-se o dimensionamento do silo baseado no procedimento recomendado por Jenike, apud Arnold et al. (1987) também utilizados por Neiva (1998b). Consiste em se utilizar ábacos de Jenike para determinação de α , e através deste determinar a abertura mínima da boca da tremonha (b_{\min}).

Calculou-se b_{\min} através da teoria de Marinelli e Carson (1992) que recomendam que b_{\min} corresponda de 3 a 4 vezes a maior dimensão da maior partícula do material para arco mecânico ou intertravante. Neste trabalho, estendeu-se esta consideração para arco coesivo.

Confeccionaram-se, então, silos com tremonhas em cunha em papelão revestido com filme vinílico, testando-se diferentes aberturas de boca da tremonha (b) e mantendo-se α , o comprimento da tremonha (a) e o comprimento da parte vertical (c) constantes. Alterando-se as dimensões de saída, há também alteração da largura (d) e da profundidade (l) da tremonha. As dimensões características do silo estão apresentadas na figura 1.

Fazendo parte do estudo do sistema silo-transportador, foi utilizada como transportadora uma calha vibratória e o ângulo de escoamento do bagaço de cana medido foi utilizado como ângulo de inclinação da mesma.

Diante das diferenças que podem ser apresentadas entre diferentes amostras deste material, os dados reportados no presente estudo devem ser considerados como valores aproximados.

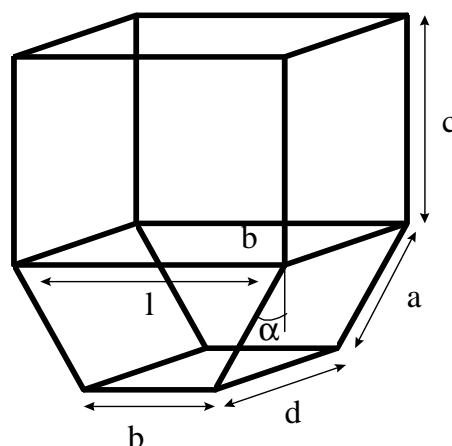


Figura 1. Dimensões características do silo

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do Bagaço de Cana

3.1.1. Granulometria

O conjunto de peneiras em que obteve-se a melhor distribuição granulométrica é apresentado na tabela 1. Apresenta-se também nesta tabela a distribuição granulométrica do bagaço de cana em função do teor de umidade.

Na faixa de tempo de 5 a 30 minutos, o tempo de peneiramento não apresentou influência sobre a variação percentual da massa retida em cada peneira. Adotou-se então 15 minutos para esta variável, como efetuado por Neiva (1998b).

Através da observação da tabela 1, vê-se que para o bagaço com teores de umidade maiores (36,42 e 65,64%), há uma tendência à formação de grumos. O que ocorre é que a umidade leva as partículas menores a se agruparem às maiores, não havendo depósito destas nas peneiras de menor diâmetro de abertura. Além disto, o material úmido apresenta maior aderência às telas das peneiras, o que dificulta a sua passagem pelas mesmas.

Tabela 1. Distribuição granulométrica e ângulo de escoamento do bagaço de cana

Teor de umidade [%] (b.u.)	Ângulo de escoamento [°]	Abertura da peneira [$\times 10^3$ m]					
		6,35	1,19	0,59	0,30	0,075	0
		Fração mássica retida [%]					
2,76	--	4,06	37,70	31,10	20,91	5,94	0,30
17,00	34,08	12,41	27,08	28,65	19,86	11,76	0,24
20,12	33,09	10,40	26,55	28,62	21,64	12,54	0,25
36,42	39,21	10,83	28,52	47,96	11,89	0,80	0,00
65,64	41,37	12,54	58,76	28,70	0,00	0,00	0,00
9,87	30,29						

3.1.2. Ângulo de Escoamento

A tabela 1 apresenta os ângulos de escoamento obtidos para o bagaço de cana em função do teor de umidade do material. Como era de se esperar, observa-se que, com o aumento do teor de umidade, é necessário aumentar também o ângulo de inclinação para que haja escoamento do bagaço de cana.

3.1.3. Densidade do Bagaço de Cana

A figura 2 apresenta a densidade do bagaço de cana (ρ) [kg/m^3] em função do teor de umidade (X) [%] (b.u.) do mesmo. A equação 1 corresponde ao ajuste da curva desta figura.

3.1.4 Porcentagem de Fibras

A figura 3 apresenta a porcentagem de fibras (pf) obtida em função do diâmetro médio (d_p) da peneira. Trabalhou-se com peneiras com d_p na faixa de $0,18 \times 10^{-3}$ a $6,35 \times 10^{-3}$ m. Pode-se observar que há uma tendência a um aumento do teor de fibras com o incremento do diâmetro

médio, a partir de um valor mínimo de 40%, para a faixa de valores testada. A equação 2 corresponde ao ajuste da curva da figura 3.

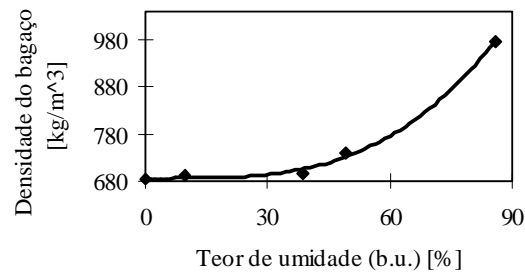


Figura 2. Densidade do bagaço de cana em função do teor de umidade

$$\rho = 0,0006X^3 - 0,0134X^2 + 0,1428X + 685,42 \quad (1)$$

coeficiente de correlação 0,9974; $0 < x < 85,8\%$ (b.u.)

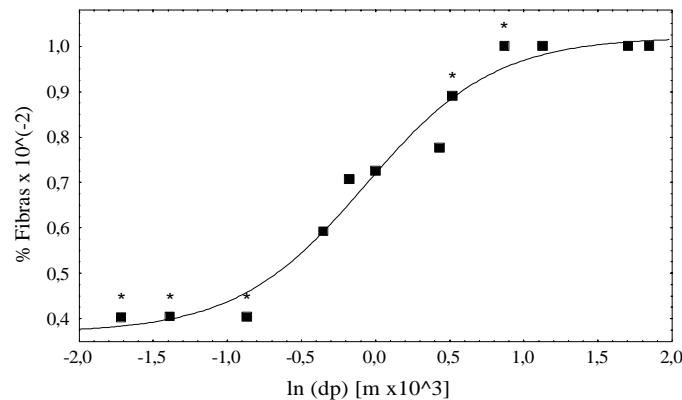


Figura 3. Relação entre porcentagem de fibras e diâmetro médiogranulométrico, onde os pontos acompanhados de * foram obtidos por Nebra e Macedo (1988)

$$pf = 100 * ((-1,6709 + 1,0197) / (1 + \exp((1000 * \ln(dp)) + 0,0654 / 0,4343)) + 1,0197) \quad (2)$$

coeficiente de correlação 0,9871; $0,18 \times 10^{-3} < \overline{d_p} < 6,35 \times 10^{-3} \text{ m}$

3.2. Dimensionamento do Sistema Silo-Transportador

Não houve escoamento do bagaço de cana devido à formação de arco coesivo ao se trabalhar com bagaço com umidade de 45,5% (b.u.) no sistema 1, porém, obteve-se escoamento ao se trabalhar com os cilindros de resina plástica.

Com base nos experimentos desenvolvidos neste trabalho e no trabalho de Neiva (1998b), observa-se que o bagaço apresenta um escoamento mais difícil por tratar-se de um material de dimensões bastante heterogêneas, composto tanto por fibras de diversos tamanhos como partículas pequenas (pó), com tendência tanto à aglomeração quanto à segregação, além da presença de umidade, que dificulta o escoamento. Os cilindros de resina plástica escoaram facilmente neste sistema por tratar-se de um material homogêneo formado por partículas de pequenas dimensões e apresentar baixa tensão de cisalhamento, além de estarem secos.

Os valores do ângulo efetivo do material (ϕ_e), ângulo de atrito entre o material e a superfície (ϕ_s), tensão principal de consolidação (σ_1) e função fluxo do material (FF) necessários para a determinação de α foram obtidos em Neiva (1998b) e são apresentados na tabela 2. Optou-se por trabalhar com valores obtidos com o material com teor de umidade próximo ao do material recolhido após a moagem, nas usinas. Embora os dados de Neiva (1998b), correspondentes aos testes de cisalhamento para o bagaço de cana, tenham sido obtidos em uma superfície de aço rugoso e se utilize aqui uma superfície lisa de papelão revestida por filme vinílico, utilizaram-se estes resultados como uma primeira aproximação. A construção do sistema em papelão objetivou uma avaliação do sistema para se optar pela posterior construção em aço. Para isto, considerou-se que as maiores dificuldades advindas dos experimentos não fossem as eventuais variações das tensões de cisalhamento para o bagaço nas diferentes superfícies e sim as características do material.

Utilizando-se os ábacos de Jenike (Arnold et al., 1987) obteve-se α na faixa de 0 a 20°. Optou-se, então, pela utilização de um valor médio de $\alpha = 10^\circ$.

Como para o bagaço de cana, num gráfico de σ_1 por tensão confinada de deslizamento (σ_c), as curvas relativas ao fator fluxo da tremonha (ff) e a função fluxo do material (FF), não se interceptam, a dimensão mínima da boca da tremonha (b_{min}) não pôde ser determinada em função de α . Optou-se, então pelo uso da teoria proposta por Marinelli e Carson (1992). Mediu-se o comprimento de fibras de uma amostra de material obtendo-se 6 cm como valor do comprimento da maior partícula. Assim, é necessário que b_{min} esteja entre 18 e 24 cm.

Tabela 2. Valores das propriedades do bagaço obtidas em ensaio de cisalhamento (Neiva, 1998b)

Teor de umidade [%] (b.u.)	ϕ_s [°]	ϕ_e [°]	σ_1 [Nm ⁻²]	σ_c [Nm ⁻²]	FF
50,4	22	55	4978	2166	2,3
50,4	22	55	4954	2860	1,7
50,4	22	58	14172	7373	1,9
50,4	22	58	14144	8201	1,7

Após calculadas as dimensões teóricas do ângulo de inclinação da tremonha com a vertical e a abertura mínima necessária, foram construídos os silos em papelão revestidos com filme vinílico e feitos diversos ensaios, sempre mantendo α constante em 10°, a altura da seção vertical e variando as demais dimensões. Na tabela 3, encontram-se as dimensões deste silos e o comportamento apresentado em relação ao escoamento do bagaço de cana.

Os silos 1, 2, 5 e 6, nos quais a abertura mínima da boca da tremonha era menor que a determinada pela teoria de Marinelli e Carson (1992), apresentaram formação de arco coesivo. Os silos 3 e 4, com abertura mínima da boca da tremonha determinada por esta teoria, não apresentaram formação de arco coesivo. Porém, nestes últimos, todo o material contido no silo escoou de uma só vez, no instante inicial da partida do escoamento.

Os silos 3 e 4 foram usados para um estudo de escoamento de bagaço úmido. Os resultados são apresentados na tabela 4.

Nos experimentos realizados para determinação da influência do teor de umidade no escoamento no silo, observou-se que com o aumento do teor de umidade, há uma diminuição da velocidade de escoamento devido à maior aderência do material às paredes, além da compactação do mesmo. Isto culminou no não escoamento do bagaço com teor de umidade de 65,65% no silo 3, como observado na tabela 4.

Para o dimensionamento completo do sistema, deve-se determinar o transportador que leva o material à etapa seguinte do processo. No presente trabalho, utilizou-se uma calha vibratória com o ângulo de inclinação com a vertical determinado no ensaio de medida de ângulo de escoamento do material.

Tabela 3- Dimensões dos silos construídos e o comportamento apresentado em relação ao escoamento do bagaço de cana

Silo	Dimensões [$\times 10^2$ m]					Formação de arco coesivo
	a	b	c	d	l	
1	20	9	35	16	16	sim
2	20	12	35	19	19	sim
3	20	18	35	25	25	não
4	20	24	35	31	31	não
5	31	9	37	21	21	sim
6	31	12	37	21	21	sim

Tabela 4. Condições de escoamento obtidas com a variação do teor de umidade do bagaço de cana

Teor de umidade [%] (b.u.)	Presença de escoamento	
	Silo 3	Silo 4
17,00	sim	sim
20,12	sim	sim
36,42	sim	sim
65,64	não	sim

Observou-se neste trabalho que o silo dimensionado oferece inicialmente uma vazão muito grande de sólidos. Objetivando trabalhar com uma vazão constante do material em cada experimento de secagem, optou-se, para este projeto, por alimentar o secador ciclônico somente com uma esteira rolante alimentada manualmente.

4. CONCLUSÕES

O tempo de peneiramento, na faixa de 5 a 30 minutos, não apresentou influência na distribuição granulométrica do bagaço de cana.

O conjunto de dados da distribuição de fibras, obtidos neste e em trabalho anterior (Nebra e Macedo, 1988), levou à obtenção de uma correlação com bom ajuste entre porcentagem de fibras e diâmetro médio granulométrico.

O aumento do teor de umidade leva à compactação do bagaço de cana, aumentando as dimensões do material tratado.

A densidade do bagaço apresentou, como esperado, uma dependência em relação ao teor de umidade do mesmo. A correlação obtida para esta relação apresentou um bom ajuste.

O produto estudado apresentou um aumento do ângulo de escoamento com o aumento do teor de umidade do mesmo.

Como o bagaço de cana apresenta dimensões bastante heterogêneas, sendo composto tanto por fibras de diversos tamanhos como partículas pequenas (pó) e baixa densidade aparente com tendência tanto à aglomeração quanto à segregação, além da presença de

umidade, o escoamento em silos torna-se bem mais difícil que o observado para a maioria dos materiais.

A teoria de Marinelli e Carson (1992) desenvolvida para o dimensionamento da abertura mínima da tremonha, quando se utilizam materiais que formam arco mecânico ou intertravante, também pôde ser aplicada para arco coesivo para o bagaço de cana, sendo que uma pequena diminuição do valor de abertura mínima do silo pode levar à formação de arco coesivo.

Variando-se o valor da abertura mínima da boca da tremonha, o comportamento do material varia bruscamente de não escoamento por formação de arco coesivo, ao escoamento total do material contido no silo no instante inicial. Isto leva a uma vazão muito grande na partida do sistema de alimentação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Profs. Drs. Meuris Gurgel Carlos da Silva e Caio Glauco Sanchez pelo empréstimo de peneiras; à Prof.a. Dra. Maria Aparecida Silva pelo empréstimo do picnômetro; ao CNPq, pelo apoio financeiro e às empresas Usina Ester e RM Comercial, que cederam o bagaço de cana e o filme vinílico, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

- Arnold, P. C., McLean, A. G., Roberts, A. W., 1987 “Determination of Hooper Geometry in Storage, Flow and Handling of Bulk Solids” em Roberts, A. W., 1987 “Storage, Flow and Handling of Bulk Solids”, Tunra Bulk Solids Research Associates, Ed. Roberts, A.W., The University of Newcastle, Austrália, pp. 3.1 a 3A.58.
- Bernhardt, W., 1999, “Handling Properties of Sugarcane Bagasse. Part III: The Phenomenon of Bridging”, *Zuckerindustrie*, Vol. 124, No.6, pp.456-461.
- Gabra, M., Salman, H., Kjellström, B., 1998, “Development of a Sugar Cane Residue Feeding System for a Cyclone Gasifier”, *Biomass and Bioenergy*. Vol.15, No. 2, pp. 143-153.
- Marinelli, J., Carson, J. W., 1992, “Solve Solids Flow Problems in Bins, Hoppers and Feeders”, *Chemical Engineering Progress*, Vol.88, No.5, pp. 22-28.
- Mohsenin, N. R., 1986, “Physical Properties of Plant and Animal Materials, Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties”. Gordon and Breach Science Publishers New York, New York 2^a. ed pp. 101-103.
- Nebra, S. A., Macedo, I. C., 1988, “Bagasse Particle Shape and Size and their Free-Setting Velocity”, *International Sugar Journal*, Vol. 80, No. 1077, pp. 168-170.
- Neiva, A. C. B., Sánchez, C. G., 1998, “Biomass Feeding Systems: Handling Sugarcane Bagasse”, 10th European Conference and Technology Exhibition Biomass for Energy and Industry - Proceedings of the International Conference, Würzburg, Germany, pp. 787-790.
- Neiva, A. C. B., 1998, “Estudo de alimentadores de bagaço de cana para reatores atmosféricos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 135 p.
- Paiva Souza, M. E., Nebra, S. A., Gallo, W. L. R., 1998, “Análise Exergética Comparativa de Sistemas de Recuperação de Energia dos Gases Efluentes de Caldeiras de Bagaço de Cana”, VII ENCIT, 7th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, pp.347 - 352.
- Souza-Santos, M. L., 1997, “A Study on Pressurized Fluidized-Bed Gasification of Biomass Through the Use of Comprehensive Simulation”, 4th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisboa, Portugal, pp. 7-13 (part 25.2).