



Estudo experimental da fluidodinâmica em leito de jorro de misturas binárias de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e de inertes

Experimental study on the fluid dynamics in a spouted bed of binary mixtures composed by sugarcane bagasse and inert particles

B. R. S. Silva¹; P. E. Resende Filho¹; A. S. Macedo²; M. M. Prado^{1,2*}

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, CEP 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil

²Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, CEP 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil

*manoelprado@ufs.br

(Recebido em 25 de julho de 2017; aceito em 07 de maio de 2018)

Neste trabalho, a fluidodinâmica de misturas binárias de partículas de bagaço de cana e de polipropileno em leito de jorro foi investigada experimentalmente sob uma ampla faixa de condições operacionais. Os efeitos do tamanho e umidade de partículas de bagaço, da razão de mistura inerte/bagaço sobre os parâmetros fluidodinâmicos do leito foram examinados. A queda de pressão máxima e a de mínimo jorro atingiram valores que variaram de 2621 a 3582 Pa, e de 54 a 196 Pa, respectivamente. Já a vazão de mínimo jorro variou de 0,0093 a 0,0111 m³ s⁻¹. As quedas de pressão máxima e de mínimo jorro foram significativamente influenciadas pelo teor de umidade e proporção volumétrica de bagaço na mistura binária, enquanto a vazão de mínimo jorro mostrou-se praticamente independente das condições operacionais empregadas. A análise estatística reforçou os resultados obtidos, representando uma ferramenta útil para indicar num trabalho futuro as condições operacionais ótimas.

Palavras-chave: fluidodinâmica, misturas binárias, leito de jorro

In this work, the hydrodynamics of spouted beds with binary mixtures composed by sugarcane bagasse and polypropylene was experimentally investigated under a broad range of operating conditions. Effects of particle size and moisture, mixing ratio on the fluid dynamics of the spouted bed were examined. The maximum and minimum spout pressure drops reached values ranging from 2621 to 3582 Pa and from 54 to 196 Pa, respectively. On the other hand, the minimum spouting flow rate ranged from 0.0093 to 0.0111 m³ s⁻¹. The maximum and minimum spout pressure drops were significantly affected by the moisture content and volumetric proportion of bagasse in the binary mixture, while the minimum spouting flow rate was found to be independent on the operating conditions employed in the present study. Statistical analysis reinforced the results, representing a powerful tool to establish in a further work the optimal operating conditions.

Keywords: fluid dynamics, binary mixtures, spouted bed

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é cultivada em mais de 80 países e os coprodutos obtidos do processo de produção de açúcar representam um grande potencial biomássico, chegando a um rendimento de 100 ton/ha. O bagaço da cana-de-açúcar é a biomassa mais representativa na matriz energética brasileira, sendo responsável pelo fornecimento de energia térmica, mecânica e elétrica para unidades industriais que produzem açúcar e álcool através de cogeração [1].

O bagaço da cana-de-açúcar representa entre 25 e 40% da massa total de material processado para a extração do caldo, dependendo do teor de fibras da cana e da eficiência do processo. Ele mostra grande potencial como fonte sustentável de matéria prima para a combustão e co-combustão com carvão, a produção de gás de síntese por gaseificação, produção de bio-óleo por pirólise e produção de bioetanol por fermentação [2]. O resíduo do processamento da cana-de-

açúcar pode também ser utilizado para outras finalidades, como por exemplo, para a produção de ração animal, adsorvente, fabricação de cimentos, entre outras.

Para o meio ambiente, entre as vantagens da utilização da energia obtida da biomassa está a redução da emissão de CO₂, o que contribui para o não agravamento do efeito estufa e para reduzir estrategicamente a dependência do uso de petróleo e gás natural. Além disso, evita-se a prática comum dos agricultores de incendiar a palha e o bagaço da cana, que gera poluição e risco de queimadas em vegetações próximas. Há também ganho para a economia, já que se tem uma nova maneira de obtenção de lucro a partir de um material que seria descartado.

No entanto, o bagaço de cana-de-açúcar possui elevado teor de umidade, o que limita sua aplicação como combustível alternativo, devido aos altos custos de transporte, às dificuldades de armazenamento e à redução da eficiência térmica durante a conversão de energia [2, 3]. Ademais, um alto teor de umidade na biomassa reduz a temperatura de combustão, causando combustão incompleta e produtos de reação indesejáveis, aumentando a emissão de gases poluentes [4].

A secagem é, portanto, uma etapa essencial nas tecnologias de conversão térmica de biomassa, como pré-tratamento para os processos de pirólise, gaseificação e combustão, e também para preservar a biomassa em períodos relativamente longos de armazenamento.

A técnica de leito de jorro aparece como uma alternativa promissora tanto para a secagem como para os processos de conversão de energia de partículas de biomassa provenientes do bagaço da cana-de-açúcar. Desenvolvida originalmente para a secagem de grãos, a aplicação desta técnica para a secagem de resíduos agrícolas e agroindustriais [5, 6], bem como para a pirólise de biomassa [7-9] vem sendo, nos últimos anos, amplamente investigada.

No entanto, as partículas de bagaço de cana como outras partículas de biomassa tendem a ter uma baixa escoabilidade em leito de jorro devido a sua natureza fibrosa, ao seu alto teor de umidade e à sua baixa densidade. Logo, para o seu processamento térmico, seja para fins de secagem, gaseificação ou combustão, em leito de jorro, onde um bom contato gás-sólido é essencial, sistemas facilitadores da circulação de partículas devem ser empregados, como por exemplo: vibração do leito, agitação do leito e uso de sólidos inertes. Destes sistemas, de acordo com Moreno et al. (2006) [10], a adição de sólidos inertes ao leito é a alternativa que menos encarece o custo do processo.

Na literatura há vários trabalhos [7, 11-13] cujos resultados mostram que misturas binárias de partículas com diferentes tamanhos, forma e densidades melhoram efetivamente a estabilidade do jorro de sistemas particulados com baixa escoabilidade. Apesar da maior estabilidade de sistemas binários de partículas em leito de jorro, a fluidodinâmica de tais sistemas é complexa, com características bem distintas dos leitos formados por monopartículas [13].

No trabalho de Santos et al. (2015) [12], partículas de areia foram utilizadas como sólido inerte para melhorar a estabilidade fluidodinâmica do leito de jorro de partículas de bagaço de cana seco, visando sua aplicação como reator químico para pirólise rápida. Neste tipo de aplicação, a areia atua também como material responsável pelo aquecimento da biomassa.

Cabe ressaltar que no trabalho supracitado a fluidodinâmica da mistura de areia e bagaço úmido não foi investigada, a qual deve ser significativamente diferente daquela envolvendo bagaço seco. Há, portanto, uma carência de informações na literatura sobre as características fluidodinâmicas necessárias para projetar e operar o leito de jorro com partículas úmidas de bagaço e partículas de sólido inerte, tendo em vista sua aplicação como secador da biomassa oriunda da cana-de-açúcar.

O comportamento de jorro da mistura de areia e partículas úmidas de bagaço tende a ser obtido somente sob condições de operação muito restritas, em razão das elevadas forças de interação das partículas úmidas de bagaço e da alta densidade da areia. Deste modo, surge a necessidade de investigar o comportamento fluidodinâmico em leito de jorro de misturas binárias compostas por partículas de bagaço de cana úmido e sólidos inertes menos densos.

Logo, o estudo da fluidodinâmica de misturas binárias de partículas de bagaço de cana e de inertes em leito de jorro é essencial para a obtenção de dados dos parâmetros de operação, tais como: velocidade mínima de jorro estável, queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro estável, os quais são necessários para determinar a menor vazão de ar capaz de jorrar o sistema, a máxima energia a ser fornecida pelo compressor e a energia consumida durante a operação, respectivamente. Esses parâmetros são de fundamental importância para especificar as condições operacionais ótimas para os processos de secagem e de pirólise em leito de jorro.

O objetivo deste trabalho foi, portanto, investigar a fluidodinâmica em leito de jorro convencional de misturas binárias de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e sólidos inertes, avaliando a influência do tamanho e do teor de umidade das partículas do bagaço de cana, bem como da composição da mistura sobre os parâmetros fluidodinâmicos: queda de pressão máxima, queda de pressão no jorro estável e vazão mínima de jorro estável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Materiais

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado neste trabalho foi obtido na feira livre do município de Frei-Paulo, estado de Sergipe, proveniente do processo de extração do caldo. Após a coleta, o bagaço foi destinado ao processo de moagem numa ensiladeira. Após a trituração, procedeu-se com uma etapa de peneiramento, cujo objetivo era a retirada do material mais grosseiro, resultando um bagaço de cana com uma faixa granulométrica mais estreita.

Como sólidos inertes foram utilizadas partículas de polipropileno, adquiridas comercialmente, apresentando também uma estreita faixa de distribuição. A Figura 1 ilustra o aspecto físico de cada partícula utilizada.



Figura 1: Partículas utilizadas nos experimentos. (a) bagaço de cana; (b) polipropileno.

2.2. Aparato experimental

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada uma típica unidade experimental de um leito de jorro, conforme esquematizado na Figura 2.

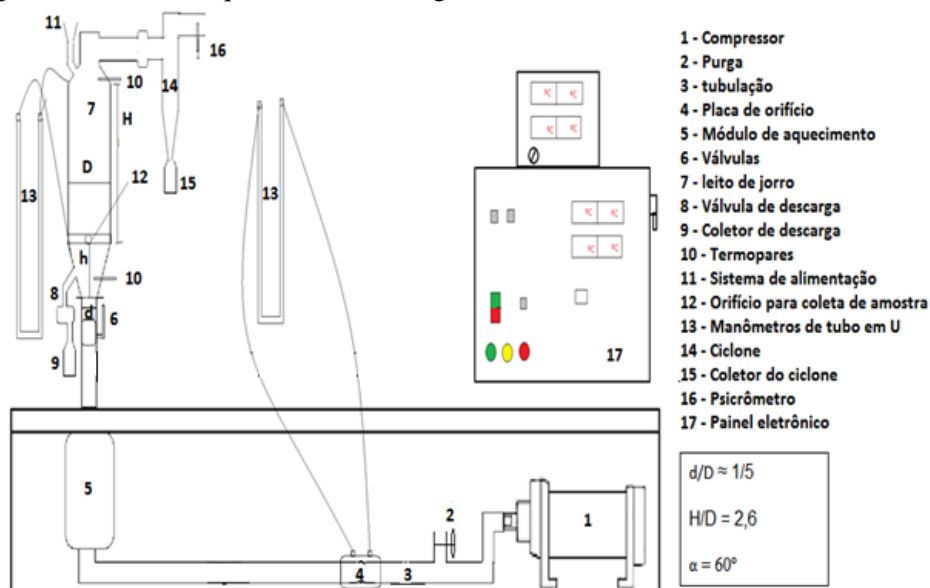


Figura 2: Esquema da unidade experimental utilizada.

Nesta unidade, um compressor centrífugo (1), marca Nova e modelo 112M, com 5,5 kW de potência, fornece o fluxo do fluido de trabalho (ar) no interior da tubulação (3) de 2 in de diâmetro,

alimentando o leito de jorro (7). As partículas são introduzidas no leito a partir do sistema de alimentação (11) e descarregadas por meio da válvula de descarga (8), sendo coletadas no coletor (9). Manômetros de tubo em U (13) permitem registrar a queda de pressão na placa de orifício (4), para determinação da vazão de ar fornecida. Por meio de tomadas de pressão localizadas na entrada e saída do leito e acopladas a outro manômetro tipo tubo em U a queda de pressão no leito é determinada. A partir de um painel eletrônico (17) é possível acionar o compressor e a válvula de descarga, bem como ter a indicação das temperaturas do ar medidas por termopares (10) instalados na entrada e na saída do leito (7).

O leito de jorro utilizado consiste num leito cilíndrico de base cônica com ângulo de 60°. Esta tem altura (h) de 0,18 m e a entrada de fluido tem diâmetro (d) de 0,043 m. Já a coluna cilíndrica tem altura (H) de 0,52 m e diâmetro (D) de 0,20 m. A base cônica foi construída em aço inox, enquanto que o corpo cilíndrico em vidro, a fim de permitir a visualização do regime de jorro.

2.3. Caracterização física das partículas

O bagaço triturado transportado para o laboratório foi submetido a uma nova etapa de peneiramento, agora com o objetivo de classificar as partículas em diferentes tamanhos. Para determinar a distribuição granulométrica e o diâmetro de Sauter foi utilizado um conjunto de peneiras padronizadas da série Tyler com as aberturas decrescentes de 5,60, 4,75, 4,00, 3,35, 2,80, 2,36, 1,40, 0,85 x 10⁻³ m. O diâmetro médio das partículas (d_p) foi calculado de acordo com a definição de Sauter:

$$d_p = \frac{1}{\sum_1^n x_i / d_i} \quad (1)$$

onde x_i é a fração mássica retida na peneira e d_i é a média aritmética das aberturas das peneiras.

A densidade real das partículas porosas de bagaço de cana foi determinada utilizando um picnômetro a gás hélio, modelo AccuPyc II 1340, da marca Micromeritics. Já as densidades das partículas não porosas de polipropileno foram determinadas via método da picnometria líquida com hexano ($\rho = 655 \text{ kg m}^{-3}$) como líquido de referência.

As densidades de empacotamento das partículas inertes, das partículas de bagaço nas três granulometrias selecionadas, bem como das misturas binárias formadas pelas combinações entre o inerte e o bagaço, foram determinadas a partir da razão entre a massa de partículas alimentadas e o volume ocupado por elas num recipiente previamente calibrado. A análise foi realizada em triplicata.

A porosidade total do leito foi calculada a partir da relação entre a densidade de empacotamento do leito (ρ_b) e a densidade real da partícula (ρ_p):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (2)$$

Os ângulos de repouso estático dos inertes e do bagaço de cana nas três granulometrias selecionadas foram determinados pelo modo estático, no qual, 0,40 kg de bagaço foram descarregados através de um funil com as seguintes dimensões: 0,02 m de diâmetro menor, 0,25 m de diâmetro maior e altura de 0,32 m. O funil foi posicionado a uma altura de 0,15 m da superfície plana, e a partir da queda livre das partículas, foi formado um amontoado suficiente para determinar experimentalmente o ângulo de repouso estático em relação ao plano horizontal. Os ensaios foram realizados em triplicata.

O teor de umidade foi determinado a partir do método da estufa a 105°C, conforme estabelecido na NBR 7993 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

2.4. Ensaios fluidodinâmicos

Nos ensaios fluidodinâmicos envolvendo misturas binárias foi investigado como o diâmetro e a umidade das partículas de bagaço, e a composição volumétrica bagaço-inerte no leito afetam os principais parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro (vazão de mínimo jorro, queda de pressão

de mínimo jorro e queda de pressão máxima). A Tabela 1 apresenta um resumo das condições operacionais empregadas nos ensaios.

Tabela 1: Condições operacionais empregadas nos ensaios fluidodinâmicos.

Leito constituído de misturas binárias (inerte + bagaço de cana)
Altura de leito estático: 0,15 m
Diâmetro das partículas de bagaço: 2,60; 3,60 e 4,40 x 10 ⁻³ m.
Umidade: bagaço úmido – X = 33,50% b.u e bagaço seco – X = 8% b.u
Composição volumétrica (bagaço – inerte) (%): 25-75; 50-50 e 60-40.
Temperatura do ar = (29,40 ± 7,50)°C

Os parâmetros fluidodinâmicos de interesse foram determinados com base nas curvas características de leito de jorro obtidas por meio da construção gráfica dos dados de queda de pressão no leito versus vazão de ar fornecida. Estas curvas foram construídas para os períodos de vazão ascendente e descendente com o auxílio do software OringinPro®.

A queda de pressão máxima experimental foi obtida por meio da curva característica no período de vazão ascendente. Esta corresponde ao valor de queda de pressão no pico da curva, sendo sua leitura realizada no eixo das ordenadas. Já a queda de pressão de mínimo jorro e a vazão de mínimo jorro foram obtidas por meio da curva característica no período de vazão descendente. A região de mínimo jorro corresponde ao ponto na curva de vazão descendente em que a queda de pressão no leito deixa de ser praticamente constante e volta a aumentar, podendo também localizar-se no início dessa região de aumento de pressão. A localização deste ponto permite fazer a leitura da queda de pressão de mínimo jorro no eixo das ordenadas e da vazão de mínimo jorro no eixo das abscissas.

2.5. Análise estatística

Após a etapa de análise fluidodinâmica por meio das curvas características construídas, realizou-se uma análise estatística a fim de analisar os efeitos das variáveis diâmetro das partículas de bagaço e proporção volumétrica de bagaço nos parâmetros fluidodinâmicos queda de pressão de mínimo jorro e vazão de mínimo jorro. Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados a fim de completar um planejamento fatorial 3² com triplicata no ponto central, o que possibilitou a obtenção da superfície de resposta por meio do software STATISTICA®, além de avaliar os efeitos lineares, quadráticos e as interações das variáveis independentes diâmetro das partículas de bagaço e proporção volumétrica do bagaço nas variáveis dependentes queda de pressão de mínimo jorro e vazão de mínimo jorro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização física das partículas

Com base na distribuição de tamanho das partículas de inertes via peneiramento verificou-se uma faixa de diâmetro médio de peneira de 3,07 a 3,67 x 10⁻³ m para partículas de polipropileno. Por sua vez, as partículas do bagaço de cana apresentaram uma distribuição uniforme entre os diâmetros médios de 1,88 a 4,38 x 10⁻³ m. A maior fração de bagaço retida – cerca de 25% – teve diâmetro médio de 5,18 x 10⁻³ m. Inicialmente foram escolhidas as partículas de bagaço com diâmetros médios de 5,18; 3,68 e 1,88 x 10⁻³ m para os ensaios fluidodinâmicos, a fim de avaliar a influência de uma ampla faixa de diâmetro sobre o comportamento fluidodinâmico.

Porém, as partículas com diâmetro médio de 5,18 e 1,88 x 10⁻³ m apresentaram problemas. As primeiras apresentaram dificuldade de jorrabilidade, que é característico do bagaço de cana-de-açúcar devido à sua forma alongada, sendo este um dos motivos do uso de inertes. Quanto maior o diâmetro, maior o alongamento das partículas de bagaço, o que explica essa maior dificuldade das partículas de diâmetro 5,18 x 10⁻³ m. Já as partículas com diâmetro de 1,88 x 10⁻³ m apresentaram um arraste muito acentuado, fato que dificultaria a análise fluidodinâmica das

misturas constituídas com este tipo de partícula. Desta forma, esses dois diâmetros foram descartados e trabalhou-se com os diâmetros de 4,38; 3,68 e 2,58 x 10⁻³ m.

Os diâmetros médios de Sauter das partículas de bagaço de cana e de polipropileno foram de 2,95 e 3,45 x 10⁻³ m, respectivamente, cujos valores correspondentes de massas específicas reais foram de 1562 kg/m³ e 900 kg/m³. Os resultados obtidos para o diâmetro e massa específica real das partículas inertes satisfazem a proposta de avaliar a influência dessa propriedade no regime fluidodinâmico em leito de jorro, uma vez que as partículas apresentam valores consideravelmente distintos.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para as densidades de empacotamento e porosidade de leitos constituídos apenas por partículas inertes e por misturas binárias formadas pelas partículas inertes e as partículas do bagaço de cana, nas diferentes composições investigadas.

Tabela 2: Densidade de empacotamento e porosidade do leito para os diferentes sistemas de partículas estudados em uma altura de leito estático de 0,15 m.

Inerte	Diâmetro do bagaço x 10 ³ (m)	Umidade do bagaço (% b.u.)	Composição do leito (inerte – bagaço) (%)	Densidade de empacotamento, ρ_b (kg m ⁻³)	Porosidade ϵ (-)
Polipropileno	-	-	100 - 0	549,4 ± 4,0	0,39
Polipropileno	4,375	33,5	50 - 50	337,3 ± 1,2	0,73
Polipropileno	3,675	33,5	50 - 50	342,7 ± 1,2	0,71
Polipropileno	2,580	33,5	50 - 50	325,2 ± 11,3	0,72
Polipropileno	4,375	33,5	75 - 25	442,6 ± 5,7	0,59
Polipropileno	4,375	33,5	40 - 60	289,2 ± 5,5	0,78
Polipropileno	3,675	8,00	50 - 50	319,1 ± 2,5	0,70

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que as densidades de empacotamento dos leitos de monopartículas inertes foram de 20 a 90% maiores que as dos sistemas binários de partículas. A porosidade do leito de 0,39 está em concordância com o valor típico de leito fixo de 0,40.

Para as misturas binárias de partículas inertes e bagaço nota-se que para uma mesma composição do leito (50% - 50%) a densidade de empacotamento e a porosidade não sofreram grande influência do diâmetro das partículas de bagaço, uma vez que não houve variações significativas ao variar a granulometria do mesmo. Para um mesmo diâmetro de bagaço ($d_p = 4,38 \times 10^{-3}$ m) verifica-se que a densidade de empacotamento diminui à medida que a proporção de bagaço na mistura aumenta, o que aumenta também a porosidade do leito. Já em relação à umidade, notou-se uma diminuição na densidade de empacotamento das misturas constituídas por bagaço seco em relação àquelas com bagaço úmido, para uma mesma proporção de bagaço no leito, o que era esperado, devido à perda de umidade. A porosidade ficou praticamente constante.

Os resultados para o ângulo de repouso estático das partículas inertes e de bagaço da cana nos diâmetros selecionados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Ângulo de repouso estático das partículas utilizadas.

Tipo de partícula	Ângulo de repouso estático – γ (°)
Polipropileno ($d_p = 3,70 \times 10^{-3}$ m)	20,45 ± 0,86
Bagaço úmido (X = 54,5% b.u.)	
$d_p = 4,38 \times 10^{-3}$ m	38,98 ± 0,31
$d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m	39,85 ± 0,29
$d_p = 2,58 \times 10^{-3}$ m	42,20 ± 2,10
Bagaço seco (X = 8% b.u.)	
$d_p = 4,38 \times 10^{-3}$ m	36,98 ± 0,80
$d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m	38,55 ± 0,48
$d_p = 2,58 \times 10^{-3}$ m	40,60 ± 1,49

De acordo com a classificação proposta por Lobato (2013) [14], as partículas inertes usadas neste trabalho apresentam a característica de fluxo livre, ou seja, apresentam uma escoabilidade muito elevada, que é a situação ideal para utilização em leitos móveis. Porém, também de acordo com esta classificação, as partículas do bagaço de cana se encaixariam na classificação de instabilidade no tipo de fluxo, o que representa uma escoabilidade não muito boa. Desta forma, justifica-se o uso das partículas de polipropileno na tentativa de melhorar a escoabilidade, uma vez que as partículas do bagaço de cana isoladamente apresentam dificuldade de entrar em regime de jorro devido a sua baixa escoabilidade.

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que o ângulo de repouso estático aumenta com a diminuição do diâmetro das partículas. Esse resultado também foi observado por Wang et al. (2010) [15], ao caracterizarem o ângulo de repouso de carvão pulverizado. De acordo com os autores, a intensidade das forças de interação interpartículas aumenta com a diminuição de seu tamanho, devido à maior área disponível em um mesmo volume. À medida que as forças interpartículas tornam-se dominantes, as partículas deixam de se comportar de maneira individual, passando a atuar como um grupo coeso.

Em relação às partículas do bagaço, Farias (2012) [16] também analisou o ângulo de repouso estático do bagaço de cana, verificando ângulos na faixa de 30 a 42° para diâmetros de 2,00 a $0,50 \times 10^{-3}$ m. Esse parâmetro foi também analisado para outros materiais fibrosos, como casca de arroz e jequitibá rosa, que apresentaram a tendência de aumento no ângulo de repouso em virtude da diminuição do diâmetro.

O ângulo de repouso diminuiu com a redução da umidade das partículas de bagaço. Silva et al. (2006) [17], ao avaliarem o ângulo de repouso de grãos de café em diferentes teores de umidades, verificaram esta mesma tendência. Segundo eles, isto se deve ao fato de que produtos com maiores teores de umidade apresentam uma maior força de coesão entre as partículas, tendendo a agregar estas partículas e, conseqüentemente, aumentar o atrito interno. Além disso, a rugosidade superficial de alguns materiais granulares também aumenta com o teor de umidade, o que causa um maior atrito partícula-partícula, impondo, assim, uma maior resistência ao escoamento do sistema particulado, o que resulta num aumento do ângulo de repouso estático do material.

Por meio das propriedades físicas determinadas e com base no diagrama de Geldart todas as partículas, incluindo bagaço e sólidos inertes, podem ser classificadas como do tipo D, capazes de produzir regimes de jorro quando submetidas a um escoamento de gás.

3.2. Comportamento fluidodinâmico

Nas Figuras 3(a) e 3(b) são mostradas as curvas fluidodinâmicas características das misturas de partículas de bagaço de cana e de polipropileno em diferentes razões volumétricas.

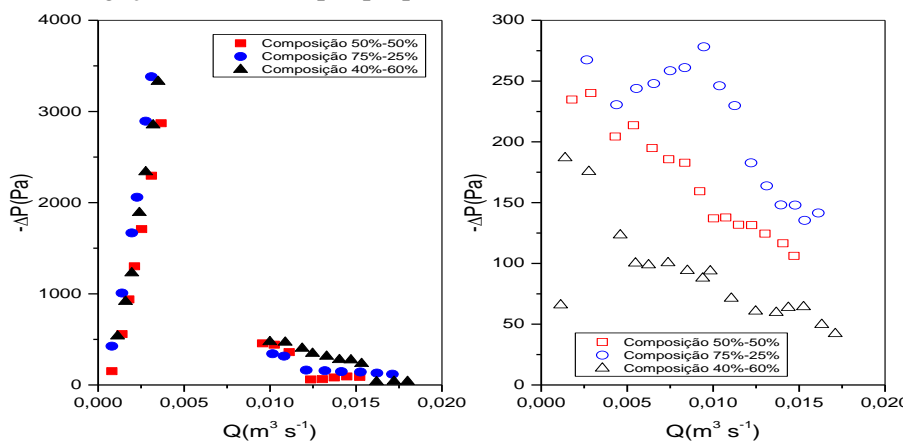


Figura 3: Curvas características de leito de jorro para misturas binárias de polipropileno e bagaço de cana com diâmetro de $4,38 \times 10^{-3}$ m e 33,50% de umidade em diferentes proporções: (a) vazão ascendente e (b) vazão descendente

As misturas binárias de bagaço de cana e partículas inertes apresentaram curvas características típicas de regime fluidodinâmico de leito de jorro. Após a queda de pressão máxima ser atingida, ocorreu uma expansão do leito de partículas não acompanhada do início

do jorro, sendo que a queda de pressão decaiu bruscamente e permaneceu praticamente constante durante o período de leito expandido, durante o qual há movimento relativo entre as partículas, mas sem a formação do jorro externo. Com o incremento da vazão de ar o regime de jorro foi estabelecido e a queda de pressão sofreu novamente uma queda, porém não brusca, voltando a permanecer praticamente constante após isso. Quando a vazão de ar passou a ser reduzida, observou-se que a queda de pressão se manteve em um patamar até um certo ponto, voltando a aumentar a partir do colapso do jorro estável até o momento em que o leito volta a ser fixo e a queda de pressão decai com a diminuição da vazão de ar.

Na Tabela 4 são listados os principais parâmetros fluidodinâmicos obtidos para misturas de partículas de polipropileno e bagaço de cana em uma altura de leito estático de 0,15 m, a partir das quais é possível avaliar como a granulometria do bagaço, a composição volumétrica do leito e a umidade do bagaço influenciam no comportamento fluidodinâmico das misturas binárias.

Para as misturas binárias de composição fixa (50%-50%) foi possível avaliar a influência do diâmetro das partículas do bagaço de cana na fluidodinâmica em leito de jorro. Verifica-se que os parâmetros fluidodinâmicos queda de pressão máxima e de mínimo jorro, e vazão de mínimo jorro não apresentaram variações significativas em relação ao diâmetro do bagaço. Nota-se que variar o diâmetro das partículas de bagaço não alterou significativamente a massa de partículas no leito, o que contribuiu para que as quedas de pressão máximas sejam similares. No que diz respeito à vazão de mínimo jorro, Santos et al. (2013)[8] afirmaram que um dos fatores importantes sobre este parâmetro é a porosidade. Dessa forma, analisando os resultados da Tabela 2, vê-se que as porosidades para as misturas de sólido inerte e partículas de bagaço de diferentes diâmetros, na proporção 50%-50%, é praticamente constante, o que justifica o fato de a vazão de mínimo jorro não ter sido influenciada pelo tamanho da partícula de bagaço.

Com relação às misturas de composições diferentes, para as quais fixou-se o diâmetro do bagaço em $4,38 \times 10^{-3}$ m, percebe-se que as misturas com 25% de bagaço possuíram a maior queda de pressão máxima, seguido pelas misturas com 60% de bagaço, enquanto que as misturas com 50% de bagaço tiveram a menor queda de pressão máxima. Nas misturas com 25% de bagaço, a carga de partículas é maior devido a uma maior quantidade de material inerte, que é mais denso que o bagaço, justificando a maior queda de pressão máxima para estas partículas. Já as misturas com 60% de bagaço, apesar de uma menor carga, apresentaram uma queda de pressão maior em relação às misturas com 50% de bagaço. Isso pode ser explicado em virtude de que para maiores quantidades de bagaço, a interação entre estas partículas fibrosas é maior, e o entrelaçamento entre elas provoca uma resistência extra ao escoamento do ar. Em relação à vazão de mínimo jorro, Santos et al. (2013) [8] também afirmam que, além da porosidade, o peso do leito afeta diretamente na condição de mínimo jorro. Dessa forma, nota-se que a massa das partículas foi mais influente, uma vez que todas as misturas com 75% de inerte apresentaram a maior vazão de mínimo jorro. Já para a queda de pressão na condição de mínimo jorro os resultados apontaram para o aumento desta com a diminuição da quantidade de bagaço no leito. Resultados similares foram obtidos por Santos et al. (2013) [8] quanto ao comportamento fluidodinâmico de misturas de bagaço de cana e areia.

Tabela 4: Parâmetros fluidodinâmicos para as misturas binárias de partículas de polipropileno e bagaço de cana em leito de jorro.

Diâmetro do bagaço $\times 10^3$(m)	Proporção de bagaço (%)	Umidade do bagaço (% b.u)	Carga (kg)	$Q_{mj} \times 10^4$ ($m^3 s^{-1}$)	ΔP_{max} (Pa)	ΔP_{mj} (Pa)
4,38	50	33,5	0,52	$93 \pm 0,86$	2939 ± 68	123 ± 36
3,68	50	33,5	0,53	109 ± 4	3582 ± 285	114 ± 14
2,58	50	33,5	0,53	95 ± 9	3237 ± 148	159 ± 20
4,38	25	33,5	0,74	111 ± 1	3419 ± 39	196 ± 34
4,38	60	33,5	0,50	104 ± 6	3057 ± 270	73 ± 1
3,68	50	8,00	0,49	$92 \pm 0,35$	2621 ± 210	54 ± 2

Com respeito à influência da umidade do bagaço, verifica-se que as quedas de pressão máxima e de mínimo jorro diminuíram com a redução do teor de umidade. Isso é consequência tanto do peso do leito, que diminui devido à ausência de água no bagaço, como também das alterações nas propriedades de escoabilidade do bagaço. Como visto na etapa de caracterização, a redução do teor de umidade diminui o ângulo de repouso do bagaço, melhorando sua escoabilidade. Além disso, Bacelos et al. (2007) [18] afirmam que a presença de um líquido revestindo as partículas origina a formação de pontes líquidas que intensificam as forças interpartículas, o que pode ocorrer com o bagaço de cana, uma vez que, segundo Meirelles (1984) [19], o bagaço de cana apresenta grande umidade superficial, que torna tais partículas coesas. Outro fator que pode ser citado é que, como já fora exposto, Silva et al. (2006) [17] afirmam que com um maior teor de umidade, certos produtos aumentam a rugosidade de sua superfície, impondo, assim, uma maior resistência ao deslizamento. Logo, a redução do teor de umidade minimiza a influência destes fenômenos, explicando, assim, o comportamento observado experimentalmente.

Em termos de vazão de mínimo jorro não foi verificada uma grande influência do teor de umidade do bagaço neste parâmetro. A umidade do material impõe uma maior resistência ao escoamento de ar devido à formação de forças interpartículas. No entanto, essas forças são mais pronunciadas enquanto o leito ainda se comporta como fixo, sendo que após o regime de jorro ser estabelecido essa barreira já fora rompida, o que explica o fato de que o teor de umidade não influencia, significativamente, a vazão de mínimo jorro.

A análise estatística (dados não mostrados) dos resultados obtidos mostra que para a queda de pressão de mínimo jorro apenas o efeito da interação entre as variáveis diâmetro e fração volumétrica não foi significativo, enquanto que para a vazão de mínimo jorro apenas o efeito da média foi significativo, mostrando que esta variável mostrou não ser influenciada pelas variáveis diâmetro de partícula e fração volumétrica do bagaço de cana nas faixas investigadas.

4. CONCLUSÃO

Os resultados de caracterização física das misturas binárias compostas por partículas de bagaço de cana e polipropileno evidenciaram que leitos com menor proporção volumétrica de biomassa são mais densos, apresentando menores valores de porosidade, resultando, portanto, numa maior resistência ao escoamento do ar e, portanto, em maiores valores de queda de pressão máxima e de mínimo jorro. Por outro lado, os efeitos opostos provocados pela adição de inertes na carga e na porosidade do leito contribuíram para que a vazão de mínimo jorro fosse praticamente independente das razões volumétricas inerte/bagaço empregadas.

O diâmetro das partículas de bagaço não mostrou influência significativa sobre os parâmetros fluidodinâmicos, sobretudo na vazão de mínimo jorro, o que é interessante do ponto de vista das aplicações industriais, uma vez que na indústria não haverá a preocupação em se fazer uma distribuição granulométrica para avaliar a melhor faixa de diâmetro para operar o equipamento.

A análise fluidodinâmica realizada no presente trabalho mostrou que a adição de partículas inertes de polipropileno viabiliza o processamento de bagaço de cana-de-açúcar em leito de jorro, à medida que contribui para o estabelecimento de um regime de jorro estável. Logo, tal técnica pode ser aplicada em outros processos, como por exemplo na secagem do bagaço ou até mesmo na pirólise do mesmo, desde que condições fluidodinâmicas adequadas sejam empregadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Deshmukh R, Jacobson, A, Chamberlin C, Kammen D. Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced cogeneration systems in the sugarcane industry, *Biomass Bioenergy*. 2013;55:163-174, doi:10.1016/j.biombioe.2013.01.033
2. Liu Y, Peng J, Kansha Y, Ishizuka M, Tsutsumi A, Jia D, Bi XT, Lim CJ, Sokhansanj S. Novel fluidized bed dryer for biomass drying. *Fuel Process Technol.* 2014 Jun;122:170–175, doi:10.1016/j.fuproc.2014.01.036.
3. Eliaers P, Pati JR, Dutta S, Wilde J. Modeling and simulation of biomass drying in vortex chambers. *Chem Eng Sci.* 2015;123:648-664, doi:10.1016/j.ces.2014.11.043

4. Gebreegziabher T, Oyedun AO, Hui CW. Optimum biomass drying for combustion: A modeling approach. *Energy*. 2013; 63:205-215, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.004>
5. Bortolotti CT, Santos KG, Francisquetti MCC, Duarte CR, Barrozo MAS. Hydrodynamic study of a mixture of west indian cherry residue and soybean grains in a spouted bed. *Can J Chem Eng*. 2013;91:1871-1880, doi:10.1002/cjce.21870
6. San José MJ, Alvarez S, López LB, García I. Drying of mixtures of agricultural wastes in a conical spouted bed contactor. *Chem Eng Trans*. 2011; 4: 673-678, doi:10.3303/CET1124113
7. Xavier TP, Libardi BP, Lira TS, Barrozo MAS. Fluid dynamics analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. *Powder Technol*. 2016;299:210-216, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.034>
8. Santos KG, Campos AVP, Ferreira LV, Santana RC, Barrozo MAS. Fluid dynamics of a sand-biomass mixture in a spouted-bed reactor for fast Pyrolysis. *Chem Eng Technol*. 2013;36(12):2148-2154, doi:10.1002/ceat.20130356
9. Fernandez-Akarregi AR, Makibar J, Lopez G, Amutio M, Olazar M. Design and operation of a conical spouted bed reactor pilot plant (25 kg/h) for biomass fast pyrolysis. *Fuel Process Technol*. 2013;112:48-56, doi:10.1016/j.fuproc.2013.02.022
10. Moreno R, Antolin G, Reyes A. Quality of fluidization for the drying of forestry biomass particles in a fluidized bed. *Biosyst Eng*. 2006;94(1):47-56, doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.01.011
11. Du W, Zhang L, Zhang B, Bao S, Xu J, Wei W, Bao X. Flow regime transition and hydrodynamics of spouted beds with binary mixtures. *Powder Technol*. 2015;281:138-150, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.077>
12. Santos KG, Francisquetti MCC, Malagoni RA, Barrozo MAS. Fluid dynamic behavior in a spouted bed with binary mixtures differing in size. *Drying Technol*. 2015;33(14):1746-1757, doi:<http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1036284>
13. Olazar M, San Jose MJ, Penas FJ, Aguayo AT, Bilbao J. Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. *Ind Eng Chem Res*. 1993;32(11):2826-2834.
14. Lobato JCM. Caracterização das propriedades de fluxo da lama vermelha para fins de dimensionamento de silos – aplicação para tremonhas cônicas. [Dissertação]. Belém: Universidade Federal do Pará, 2013.
15. Wang W, Zhang J, Yang S, Zhang H, Yang H, Yue G. Experimental study on the angle of repose of pulverized coal. *Particuology*. 2010;482-485.
16. Farias FOM. Caracterização de biomassa brasileira para fins de aproveitamento energético. [Dissertação]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2012.
17. Silva FS, Corrêa PC, Júnior, CC, Gomes FC. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. *Rev Bras de Produtos Agroind*. 2006;8(1):17-23.
18. Babelos MS, Passos ML, Freire JT. Effect of interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution. *Powder Technol*. 2007;174(3):114-126, doi:10.1016/j.powtec.2007.01.023
19. Meirelles AJA. Secagem de bagaço de cana em leito fluidizado. [Dissertação]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1984.