



DESEMPENHO DE UM SISTEMA FLUIDIZADO DE ALIMENTAÇÃO DE PARTICULADO COM MÚLTIPLAS SEÇÕES DE DESCARGA

João Paulo Tureso

Aluno bolsista FAPESP do Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP

Geraldo Lombardi

Prof. Dr. Do Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP

Fernando Eduardo Milioli

Prof. Dr. do Departamento de engenharia Mecânica, EESC/USP

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465

CEP 13560-250

***Resumo.** Foi estudado um sistema de alimentação de particulado baseado em princípios da fluidização a ar. O sistema é basicamente formado por duas placas injetoras de ar confinadas em uma câmara. A primeira placa é posicionada na base do cone de repouso de um silo de alimentação. Desta placa as partículas caem em uma segunda placa de injetores com a função de distribuir o particulado entre as quatro seções de descarga. Experimentos de repetibilidade foram feitos para conferir a possibilidade de controle da alimentação de sólidos através do controle da taxa de ar feito por uma válvula esfera para a placa primária. Partículas de areia de três diferentes granulometrias foram usadas, com tamanhos médios de 152, 287 e 484 μm . O sistema mostrou-se de difícil controle e de pobre repetibilidade. Porém, apresentou excelentes características quanto à uniformidade da distribuição de sólidos através de várias seções de descarga.*

***Palavras chave:** Leito fluidizado, fluidização, alimentação de particulado*

1 - INTRODUÇÃO

Na indústria, milhões de toneladas de partículas sólidas, dos mais variados tipos, são transportados todo mês. Estas partículas devem ser retiradas de depósitos ou silos e transportadas para o local de processamento.

Os sistemas mecânicos usados para executar este tipo de tarefa adicionam o particulado de forma localizada no processo, e suas partes móveis estão sujeitas a desgastes. Dependendo do tipo de particulado a ser transportado estes sistemas apresentam outras desvantagens como o tamanho excessivo do alimentador, velocidade de operação e necessidade de manutenção periódica. Estes fatores aumentam gastos com mão de obra especializada, óleo lubrificante, reposição de peças e consumo de potência.

Uma alternativa para evitar os sistemas mecânicos é a utilização de sistemas pneumáticos. O uso de sistemas pneumáticos vem crescendo na indústria, pois permitem uma

operação segura e diminuição de gastos. Ainda, estes sistemas são de operação mais simples ao transportarem sólidos em altas temperaturas e/ou em altas pressões. Os dispositivos pneumáticos apresentam bom controle do fluxo de alimentação, o que é de fundamental importância em muitas operações na indústria.

Em geral, a introdução de reagentes em reatores deve ser necessariamente controlada. Em reatores de leito fluidizado, em termos ideais, a alimentação deve ser uniforme e distribuída sobre a área de seção transversal a fim de não existirem diferenças de eficiência de reação no meio fluidizado. Em reatores de leito fluidizado, que utilizam carvão como combustível e absorventes calcários para retenção de enxofre, a distribuição não uniforme na alimentação conduz a perdas consideráveis de particulado nas zonas ricas em carvão e calcário, na forma elutriada, CO e hidrocarbonetos não queimados (Borges, 1987).

O sistema de injeção em estudo neste trabalho consiste em um dispositivo de alimentação de particulado baseado em princípios de fluidização, o qual supre linhas pneumáticas de processos. Apresenta quatro pontos de descarga de sólido, o que o torna de grande aplicabilidade na alimentação de reatores, pois evita-se assim que os particulados adicionados concentrem-se em determinadas regiões. O projeto do injetor com múltiplos pontos de descarga de sólidos baseia-se em um sistema anterior de alimentação fluidizado com descarga única (Lombardi et al., 1990; Lombardi et al., 1994; Pécora, 1995). Não há na literatura outros trabalhos relacionados a esse tipo de sistema de injeção de particulado.

As taxas de alimentação de sólidos a serem determinadas devem ser portanto relacionadas à parâmetros de fluidização. Nesse trabalho as descargas de ar que causam o transporte do particulado são expressos em termos da velocidade de mínima fluidização do particulado, U_{mf} . Há inúmeras correlações na literatura para a determinação desse parâmetro (Geldart, 1986). Nesse trabalho é utilizada a equação de Wen & Yu (1966):

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_m} \left\{ (1135,7 + 0,0408 Ar)^{\frac{1}{2}} - 33,7 \right\}$$

Onde:

μ é a viscosidade do ar [kg/ms]

ρ_g é a massa específica do ar [kg/m³]

Ar é o número de Archimedes dado por:

$$Ar = \frac{\rho_g d_m^3 (\rho_p - \rho_g)g}{\mu^2}$$

Onde:

ρ_p é a massa específica da partícula [kg/m³]

g é a aceleração da gravidade [m/s²]

d_m é o diâmetro médio da partícula [m]

Este trabalho tem por objetivo principal estabelecer a performance de um injetor fluidizado de particulados em diferentes situações operacionais, tendo em vista a uniformidade de distribuição entre vários pontos de descarga.

2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL E DOS TESTES REALIZADOS

2.1 - Descrição do sistema experimental

Disponha-se de um sistema experimental montado para teste do injetor múltiplo. O sistema permitia a coleta do material sólido descarregado nos 4 ciclones. A Figura 1 mostra o sistema experimental.

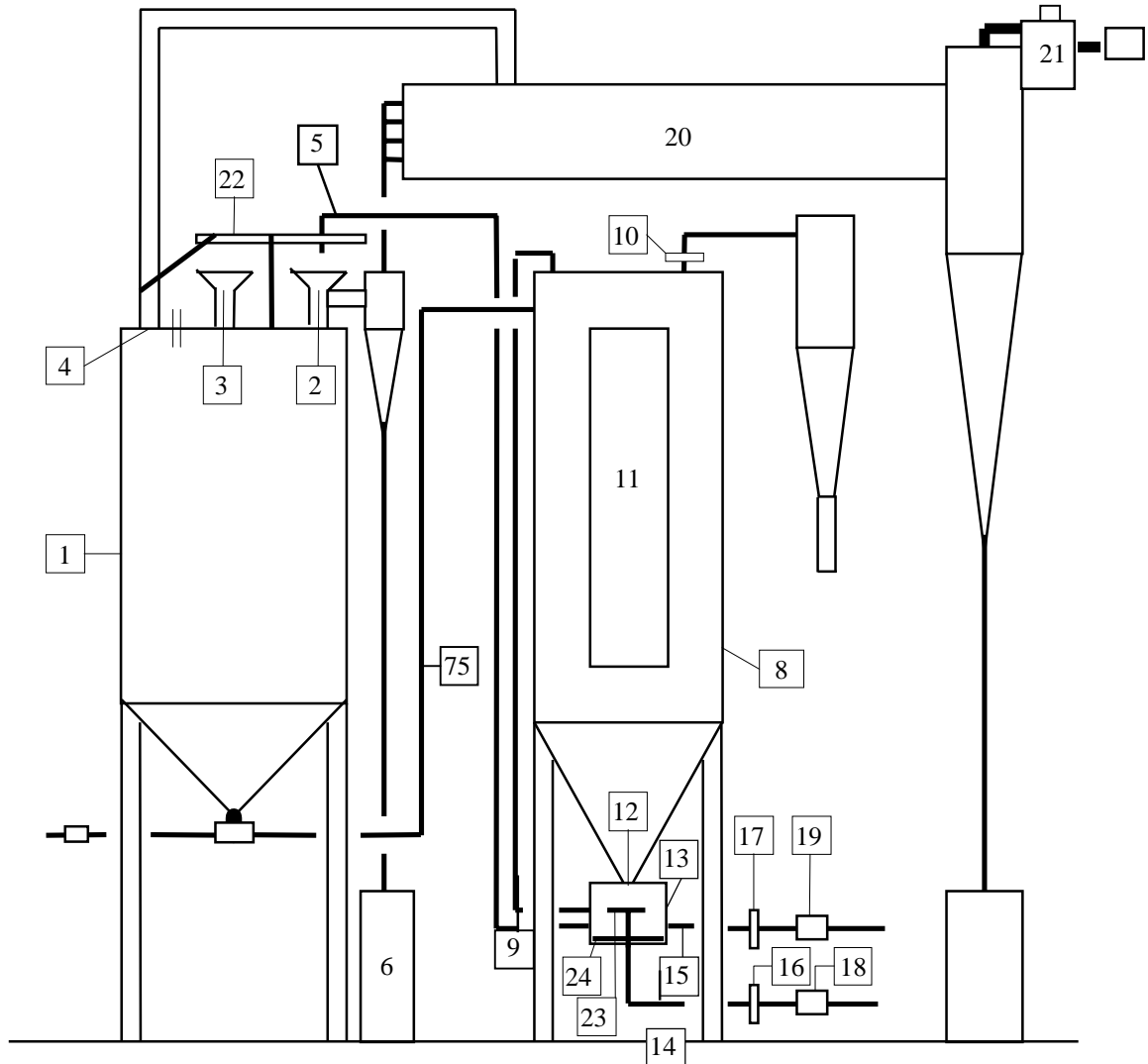


Figura 1 - Desenho esquemático do sistema experimental. 1) silo de reposição de sólidos; 2) entrada de sólidos para o sistema de exaustão; 3) coletor do silo de reposição; 4) saída para exaustão do silo de reposição; 5) saída do injetor; 6) tambor utilizado para amostragem; 7) tubulação utilizada para transportar o sólido do silo de reposição até o silo de alimentação; 8) silo de alimentação de sólidos; 9) equalizador da pressão; 10) válvula; 11) visor; 12) entrada de sólido no injetor múltiplo; 13) injetor múltiplo de sólido; 14) entrada de ar primário; 15) entrada do ar secundário; 16) placa de orifício do ar primário; 17) placa de orifício do ar secundário; 18) válvula de alimentação do ar primário; 19) válvula de alimentação do ar secundário; 20) tubo mestre do exaustor; 21) exaustor; 22) placa direcionadora dos injetores; 23) placa de injetores do ar primário; 24) placa de injetores do ar secundário.

O sistema é constituído basicamente por um silo de alimentação de sólidos, por um injetor múltiplo de sólidos, pelo silo de reposição de sólidos e por um sistema de exaustão.

O silo de alimentação tem a função de armazenar e fornecer sólido para o injetor múltiplo de sólido. No topo do silo há também uma abertura ligada ao injetor com a finalidade de equalizar a pressão.

O injetor múltiplo de sólido, é do tipo não mecânico e é constituído basicamente por: uma entrada na parte superior que é utilizada para alimentação de sólido; duas placas de injetores de ar colocadas em níveis diferentes: a placa inferior, ou secundária dividida em quatro setores iguais, cada um deles conectado a um bico de descarga do sólido; a placa superior, ou primária, suportando o cone de repouso de sólidos na boca do silo de alimentação; uma entrada de ar na base da placa primária denominada injeção de ar primário com a função de destruir o cone de repouso e prover o escoamento de sólidos; uma entrada de ar na lateral para a placa de injeção de ar secundária, a qual promove a distribuição para os quatro bicos de descarga de sólidos a serem transportados pneumaticamente. O conjunto de injeção múltipla de sólidos possui ainda três visores e duas lâmpadas para facilitar a visualização. A Figura 2 mostra detalhes do injetor múltiplo.

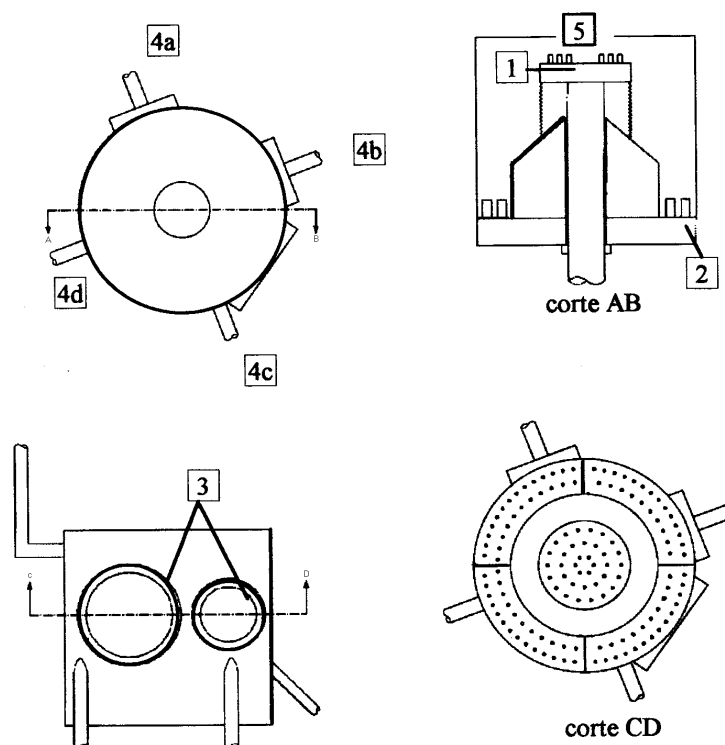


Figura 2 - Desenho esquemático do injetor múltiplo de sólido. 1) Placa de injetor de ar primário; 2) Placa de injetores de ar secundário; 3) Visores; 4ª, 4b, 4c, 4d) Pontos de descarga de particulado; 5) Boca do silo de alimentação.

A placa de injetores primária contém 16 bicos injetores do tipo torre, e a placa de injetores secundários contém 32 bicos do tipo “bubblecaps”. Os injetores primários compreendem um total de 6 furos de 1,2 mm.

O silo de reposição de sólidos possui no topo uma placa direcionadora dos injetores. A placa direcionadora pode ser posicionada para coleta de particulado para amostragem ou posicionada para o coletor do silo de reposição. Há quatro conjuntos ciclone/tambor de amostragem correspondentes às quatro linhas de descarga do sistema.

O sistema de exaustão é constituído por um tubo mestre no qual estão ligadas as tubulações proveniente do silo de reposição e a tubulação proveniente do ciclone de amostragem.

2.2-Descrição dos testes realizados

A Tabela 1 mostra os parâmetros operacionais considerados nos diferentes testes realizados.

Três grupos de testes experimentais foram realizados. Os dois primeiros visaram estabelecer a descarga total de sólidos, a uniformidade de distribuição entre os injetores, e o efeito da granulometria do particulado no processo. Os vários testes realizados em cada um desses grupos foram feitos para verificação de repetibilidade. O terceiro grupo de testes visou estabelecer o efeito no processo da distância (h_c) entre a boca do silo de alimentação e a base da placa de injetores de ar primário.

Tabela 1 - Parâmetros operacionais considerados nos testes experimentais.

teste	d_m (μm)	h_c (mm)	Q (m^3/s) $\times 10^{-4}$
1	287	15	5,6 - 43,4
2			5,8 - 42,8
3			7,9 - 47,6
4			8,1 - 48,9
5			5,8 - 35,0
6			5,9 - 44,7
7	484	15	5,9 - 52,9
8			6,0 - 39,0
9			5,9 - 46,6
10			5,9 - 45,0
11	152	15	6,0 - 54,1
12		13	5,9 - 41,6
13		11	8,4 - 50,3
14		9	5,9 - 54,7
15		7	8,3 - 40,0

A tabela 2 mostra a análise granulométrica das areias utilizadas, com diâmetros médios de respectivamente 152 μm , 287 μm e 484 μm .

O diâmetro médio (diâmetro de Sauter) da partícula é determinado através da expressão (Geldart, 1986):

$$\frac{1}{d_m} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_{pi}}$$

Onde:

d_m é o diâmetro médio da partícula [m]

d_{pi} é a abertura média das peneiras [m]

x_i é a fração retida em cada peneira

Tabela 2 - Análise granulométrica das areias utilizadas nos testes.

Malha	faixa granulométrica (μm)	Fração Retida		
		152 μm	287 μm	484 μm
#710	$d > 710$			0,0001
#590	$710 \geq d > 590$			0,0003
#500	$590 \geq d > 500$	0,0000	0,0000	0,3384
#420	$500 \geq d > 420$	0,0007	0,0000	0,6450
#350	$420 \geq d > 350$	0,0005	0,0002	0,0122
#297	$350 \geq d > 297$	0,0007	0,2107	0,0035
#250	$297 \geq d > 250$	0,0017	0,7071	0,0004
#210	$250 \geq d > 210$	0,0393	0,0304	0,0001
#177	$210 \geq d > 177$	0,2710	0,0214	
#149	$177 \geq d > 149$	0,4316	0,0093	
#125	$149 \geq d > 125$	0,1628	0,0047	
#105	$125 \geq d > 105$	0,0451	0,0033	
#088	$105 \geq d > 88$	0,0366	0,0030	
#074	$88 \geq d > 74$	0,0075	0,0023	
#062	$74 \geq d > 62$	0,0025	0,0035	
#053	$62 \geq d > 053$		0,0003	
Prato	$d < 053$		0,0038	
Total		1,0000	1,0000	1,0000

3 - RESULTADOS

3.1-Resultados para particulado de 287 μm

A Figura 3 mostra a descarga total de sólidos do injetor múltiplo em função da vazão de ar primário. Observa-se um comportamento aproximadamente linear. O desvio padrão (σ) dos resíduos entre valores experimentais e preditos pela reta dos mínimos quadrados resulta 30,26 g/s. Os grandes erros da curva de calibração, principalmente nas vazões de ar primário mais baixas, refletem as condições pobres de repetibilidade do sistema.

A Figura 4 mostra o maior desvio na descarga de um injetor em relação à descarga média dos injetores, em função da vazão de ar primário. Observa-se que os máximos desvios variam entre 1 e 27 %, sendo maiores nas vazões de ar primário mais baixas.

3.2-Resultados para particulado de 484 μm

A Figura 5 mostra a descarga total de sólidos do injetor múltiplo em função da vazão de ar primário. Observa-se um comportamento aproximadamente linear similar ao observado para o particulado de 287 μm . O desvio padrão (σ) dos resíduos entre os valores experimentais e preditos pela reta dos mínimos quadrados resulta 30,79 g/s. Novamente, os grandes erros da curva de calibração, principalmente nas vazões de ar primário mais baixas, refletem as condições pobres de repetibilidade do sistema.

A Figura 6 mostra o maior desvio na descarga de um injetor em relação à descarga média dos injetores, em função da vazão de ar primário. Observa-se que os máximos desvios variam entre 0,002 e 14,5 %, sendo maiores nas vazões de ar primário mais baixas.

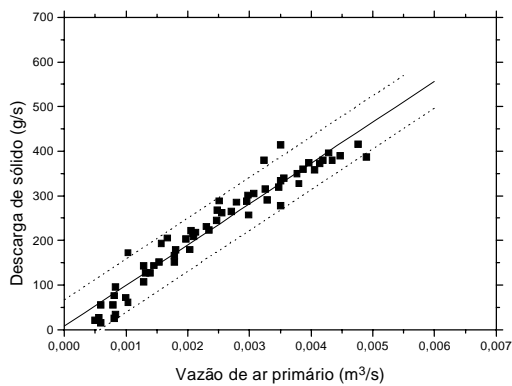


Figura 3 – Descarga total de sólido para particulado de 287 μm e $h_c = 15$ mm, ■ resultado experimental, — reta ajustada e -- Intervalo de confiança de 95 %.

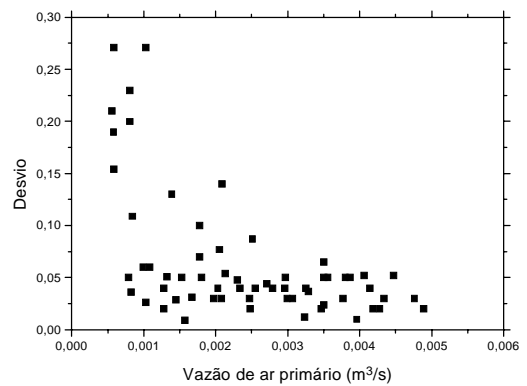


Figura 4 - Maior desvio na descarga de um injetor em relação a média dos injetores para particulado de 287 μm e $h_c = 15$ mm.

3.3-Efeitos da granulometria do particulado.

Observa-se que nas vazões de ar primário mais elevadas a descarga de sólidos é diretamente proporcional a granulometria do particulado. Nas vazões mais baixas o processo de alimentação de sólidos torna-se bastante instável, dificultando a avaliação comparativa entre as diferentes granulometrias. O gradiente menos intenso da curva para o particulado mais fino indica menor sensibilidade em relação à vazão de ar. As retas ajustadas caracterizam-se por grandes desvios para ambas as granulometrias.

Os maiores desvios na descarga de sólidos de um injetor em relação à média dos injetores ocorreram nas vazões mais baixas de ar, e resultaram respectivamente 27 % e 14,5 %. Para as partículas de 287 μm e 484 μm . Esses números refletem a condição instável de alimentação nas vazões de ar primário mais baixas. Os menores desvios são observados para o particulado mais grosseiro, indicando distribuição mais uniforme entre os quatro injetores.

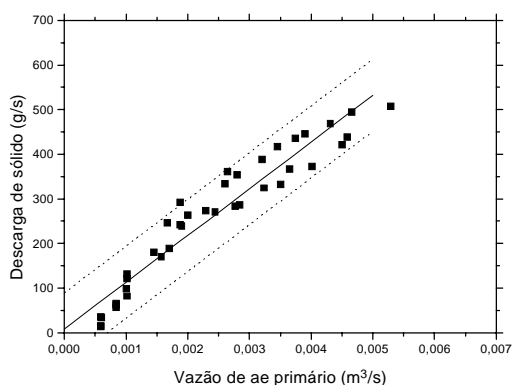


Figura 5- Descarga total de sólido para o particulado de 484 μm e $h_c = 15$ mm, ■ resultado experimental, — reta ajustada e -- intervalo de confiança de 95%.

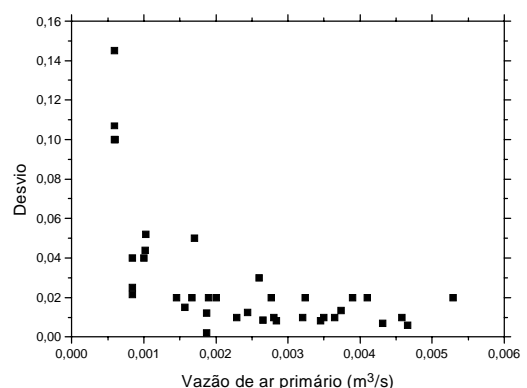


Figura 6 - Maior desvio na descarga de um injetor em relação a média dos injetores para o particulado de 484 μm e $h_c = 15$ mm.

3.4-Efeitos da distância entre a boca do silo de alimentação e a base da placa de injetores de ar primário

A Figura 7 mostra a descarga total de sólidos do injetor múltiplo em função da vazão de ar primário e das distâncias entre a boca do silo e a placa de injetores para um particulado com diâmetro médio de 152 μm . Nota-se que quanto maior a distância h_c maior a descarga de sólidos, a qual varia de forma linear em relação a vazão de ar primário para todas as distâncias consideradas. Nas maiores distâncias observa-se maiores gradientes da curva, indicando maior sensibilidade do sistema em relação à vazão de ar primário. A Figura 8 mostra o maior desvio na descarga de sólido de um injetor em relação à média dos injetores, em função da vazão de ar primário. Observa-se que os máximos desvios variam entre 1,4 e 27,6 %, e são maiores nas vazões de ar primário mais baixas.

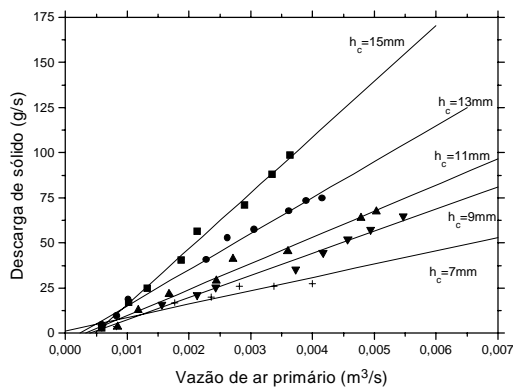


Figura 7 - Descarga total de sólidos para particulado de 152 μm para várias distâncias entre a boca do silo de alimentação e a placa de injetores de ar primário, h_c .

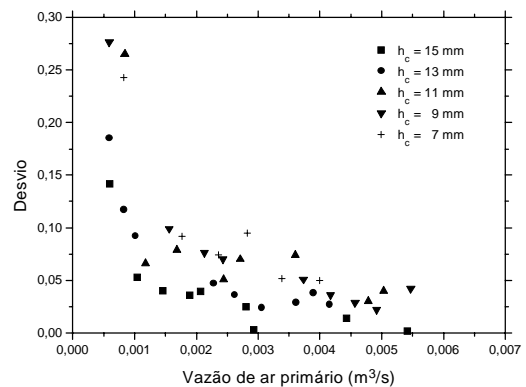


Figura 8 - Maior desvio na descarga de um injetor em relação à descarga média dos injetores para o particulado de 152 μm .

3.5-Efeitos da velocidade superficial do ar primário

A velocidade superficial do ar é estabelecida com base no diâmetro da placa de injetores.

Os resultados para o particulado de 152 μm foram obtidos para velocidades superficiais do ar entre 4,08 e 37,44 vezes a velocidade de mínima fluidização. Para descargas de particulado da ordem de 400 g/s foram necessárias velocidades superficiais da ordem de 37 vezes U_{mf} .

Os resultados para o particulado de 287 μm foram obtidos para velocidades superficiais do ar entre 1,06 e 10,49 vezes a velocidade de mínima fluidização. Para descargas da ordem de 400 g/s foram necessárias velocidades superficiais da ordem de 7 a 9 vezes U_{mf} .

Para o particulado de 484 μm as velocidades superficiais do ar variam entre 0,41 e 3,67 vezes U_{mf} . Para descargas de particulado da ordem de 400 g/s foram necessárias velocidades superficiais da ordem de 2 a 3 vezes U_{mf} .

Para o particulado de 152 μm e baixas vazões de ar, mesmo em situações acima de U_{mf} , não houve perturbação suficiente do cone de repouso para permitir escoamento de partículas. Nesses casos, aparentemente, a fluidização que estaria ocorrendo restringe-se às regiões próximas à placa de injetores. Com o escoamento ascendente, o ar passa a fluir através de seções transversais crescentes, causando defluidização.

Para o particulado de 484 μm , por outro lado, consegue-se perturbar o cone de repouso o suficiente para permitir o escoamento de partículas mesmo à velocidades superficiais abaixo de U_{mf} . Nesses casos, aparentemente, as perturbações impostas pelos jatos nos bicos injetores estariam se propagando através do particulado, causando quebra do cone de repouso. Resultados e discussões mais detalhados podem ser encontrados em Tureso (1998).

4-CONCLUSÕES :

São as seguintes as conclusões deste trabalho:

A) A literatura não apresenta estudos em sistemas fluidizados com características semelhantes àquele considerado neste trabalho, em particular no que se refere à utilização de placas de injetores tipo bandeja, com perímetro livre.

B) Em vazões mais baixas o processo de alimentação de sólido torna-se bastante instável, dificultando a avaliação comparativa entre as diferentes granulometrias. O gradiente menos intenso da curva de descarga de sólidos em função da vazão de ar primário para o particulado mais fino indica menor sensibilidade deste em relação à vazão de ar. Os máximos desvios em relação à média das descargas de sólido entre os quatro injetores ocorreram nas vazões mais baixas de ar.

C) Quanto maior h_c maior a descarga de sólidos, a qual variou de forma linear em relação a vazão de ar primário para todas as distâncias consideradas.

D) Conclui-se ser recomendável a operação do sistema múltiplo de injeção em vazões de ar em torno de 0,003 m^3/s ou superiores.

E) Pode-se supor dois mecanismos distintos causadores do escoamento de particulados e quebra do cone de repouso. Para as menores granulometrias, o processo é aparentemente controlado por fluidização das partículas de base próximas à placa de injetores. Para as maiores granulometrias, o processo de escoamento de sólidos é aparentemente iniciado a partir de perturbações impostas às partículas de base pelos jatos dos bicos injetores. Em vazões de ar maiores, possivelmente o processo de fluidização passa a ter influência significativa.

F) O sistema múltiplo de injeção de particulados mostrou-se de difícil controle, com condições pobres de repetibilidade impondo grandes erros às retas ajustadas. Por outro lado, o sistema apresentou boas características quanto à uniformidade de distribuição da descarga de sólidos entre os quatro injetores.

REFERÊNCIAS

BORGES, M.G.S. (1987). Injetor-Dosador Pneumático de Particulado Sólido de Leito Fluidizado Denso. São Carlos. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GELDART, D. (1986). Gas Fluidization Technology. New York, John Wiley.

LOMBARDI, G.; PAGLIUSO, J.D.; PÉCORÀ, A.A.B.; GOLDSTEIN, L. (1994). New Particulate Solids Pneumatic Feeding Device With Mass Flowrate Control. Powder Technology. v.79, p.265-268.

LOMBARDI, G.; PAGLIUSO, J.D.; PÉCORÀ, A.A.B.; GOLDSTEIN, L. (1990). Desenvolvimento de um Alimentador de Sólidos Particulados. III Encontro Nacional de Ciências Térmicas. Itapema - SC.

- PÉCORA, A.A.B.(1995). Estudo da Fluidodinâmica de Leitos Fluidizados Circulantes com Injeção de Ar Secundário. Campinas. Tese de doutorado - Universidade Estadual de Campinas.
- TURESO, J.P. (1998). Estudo de um Injetor Dosador Múltiplo de Particulado Sólido. São Carlos. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- WEN, C.Y.; YU, Y.H. (1966). A Generalized Method for the Minimum Fluidization Velocity. Aiche Journal, v.12, n.3, p.610-612.

THE PERFORMANCE OF A FLUIDIZED PARTICULATE FEEDING SYSTEM WITH MULTIPLE DISCHARGE SECTIONS

***Abstract.** A particulate feeding system based on air fluidization principles was studied. The system is basically formed of a chamber comprising a set of two fluid bed distributor plates. The first plate holds the bottom of a resting cone provided by a feeding hopper. The particles from this plate are dropped into a second distributor plate which provides the distribution of the particulate stream among four discharge sections. Repeatability experiments were performed in order to check out for the possibility of solids feeding control through a sphere valve which controls the air feed rate to the first distributor plate. Silica sand particles of three different granulometries were used, with mean sizes of 152, 287 and 484 μm . The system was observed to be of difficult control and showed poor repeatability. However, the system was found to be an excellent device for distributing the flow of solids throughout several discharge sections.*

***Keywords:** fluidization; feeding system; fluidized bed*