

DETERMINAÇÃO DA TRANSIÇÃO DE REGIMES DE FLUIDIZAÇÃO EM UMA BANCADA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE OPERANDO A FRIO

Stéphani PASSOS LUDGERO¹; Thiago FERNANDES DE AQUINO²; Amanda MARCOS LOPES³

¹Faculdade Satc, stephani.ludgero@gmail.com; ²Faculdade Satc, thiago.aquino@satc.edu.com; ³Faculdade Satc, amanda.lopes@satc.edu.br

RESUMO

Unidades industriais que atuam com contato gás-sólido podem estar em regime de leito fixo, fluidizado ou fluidizado circulante, dependendo das condições de operação como a velocidade do gás e geometria do equipamento. Os sistemas de conversão em leito fluidizado circulante são utilizados com mais frequência na aplicação das partículas sólidas em processos catalíticos e sistemas gás-sólido por proporcionar boa mistura, boa operação com sólidos finos em altas velocidades, excelente transferência de calor ao longo do leito e maior flexibilidade na utilização de combustíveis sólidos. Baseado nisto, o presente artigo teve como finalidade analisar o comportamento de dois tipos de esferas de vidro e areia de fundição em uma bancada de leito fluidizado circulante, operando a frio, a fim de obter dados da fluidodinâmica com a possibilidade de aplicação em simulações. As partículas foram caracterizadas quanto à densidade, diâmetro médio e classificadas conforme Geldart. Foram determinadas, experimentalmente, as velocidades de transição entre os regimes de fluidização que requerem a recirculação de sólidos, baseando-se em metodologia de tempo de esvaziamento do riser, isto é, sem o retorno das partículas para dentro do leito. As velocidades determinadas foram a de mínima fluidização e duas velocidades de transporte, onde a primeira representa o início da fluidização rápida e a segunda o início do transporte pneumático. A quantidade de material a ser inserida no leito foi definida de modo a obter um leito denso e uma quantidade máxima de partículas no downcomer, evitando fluidização nesta parte do equipamento. Os valores alcançados para a areia de fundição estão de acordo com aqueles apresentados na literatura, uma vez que os gráficos que apresentam o tempo necessário para as partículas migrarem do leito em função da velocidade superficial do gás foram semelhantes em ambas as pesquisas.

Palavras-chave: Leito fluidizado circulante. Regimes de fluidização. Velocidade de transporte. Velocidade de mínima fluidização.

ABSTRACT

Industrial units that operate with solid-gas contact can be in fixed bed regime, fluidized or circulating fluidized, depending on operations conditions as velocity gas and geometry of equipment. Conversion systems in circulating fluidized bed are used more frequently on applications of solid particles in catalytic process and gas-solid systems to provide good mixture, good operation with fine solids in high velocities, excellent heat transfer along the bed and higher flexibility in use of solids fuels. Based on this, the present paper aimed to analyze the behavior of two kinds of glass beads and casting sand in a circulating fluidized bed equipment, operating without heat transfer, in order to obtain fluid dynamic's data with the possibility of use on simulations process. The particles was characterized as for density, medium diameter and characterized according to Geldart. It were determined, experimentally, the transition velocities between the fluidization regimes that require the solids recirculation based on methodology of emptying time of the riser without the particles return into the bed. The determined velocities were minimum fluidization and two transport velocities, where the first one represents the beginning of fast fluidization and the second one the beginning of pneumatic transport. The amount of material to be inserted into bed was defined in order to obtain a dense bed and a maximum amount of particles on downcomer, avoiding fluidization on this part of equipment. The achieved values to casting sand are according to those ones exposed by literature, once the charts that show the required time for the particles migrate out from the bed as a function of gas surface velocity was similar in both researches.

Key-Words: Circulating fluidized bed. Fluidization regimes. Transport velocity. Minimum fluidization velocity.

1. INTRODUÇÃO

De grande interesse e aplicação na indústria de processos químicos, as partículas sólidas são empregadas nos mais diversos setores, podendo ser utilizadas como catalisadores e submetidas a transformações físicas e químicas, aplicadas em sistemas que empregam leitos fixos, leitos fluidizados e em leitos fluidizados circulantes.

O estudo de regimes de escoamento que aborda as velocidades de transição entre os regimes em um sistema operando com circulação de partículas é de grande importância a nível científico e industrial, uma vez que para a obtenção de resultados satisfatórios em escala industrial é indicado primeiramente conhecer e compreender o comportamento das partículas em um protótipo experimental de menor porte.

Com a utilização de carvão mineral brasileiro, principalmente em indústrias cerâmicas, em tecnologias de leito fluidizado para combustores ou gaseificadores, a maior parte do leito fluidizado é formada por cinzas de carvão. Nesse contexto, os dois tipos de esferas de vidro e a areia de fundição utilizadas neste estudo representam a aplicação das cinzas do carvão nos testes com dinâmica não reacional, considerando a semelhança em sua composição química e parâmetros físicos.

Conforme Nitz e Guardani (2008), a fluidização gás-sólido inicia quando há injeção ascendente de fluido dentro do leito de partículas que adquire velocidade para suportar a injeção sem sofrer arraste. A massa suspensa apresenta características de um líquido em ebulição; tal massa tem ângulo de repouso zero e assume a forma do leito (PERRY; GREEN, 1999).

Um leito fluidizado apresenta regimes de fluidização que variam com as características dos sólidos e fluidos presentes no leito, assim como para com a velocidade superficial que o fluido atravessa o leito (BIANCHI; AQUINO, 2014).

Para que ocorra o movimento das partículas é necessário atingir a velocidade mínima de fluidização, uma vez que abaixo dela não há fluidização e muito acima há o arraste de sólidos para fora do leito. Assim, o regime particulado ou fluidização incipiente é delineado pela velocidade mínima de fluidização, que é a menor velocidade necessária para que os sólidos fiquem suspensos no gás (CARDOSO, 2008).

Aumentando a vazão do gás de maneira que ultrapasse a velocidade mínima de fluidização, o leito caracteriza-se em regime borbulhante. Este regime apresenta instabilidades e aparecimento de bolhas de gás (CARDOSO, 2008; MILIOLI, 2006).

Os regimes turbulentos e de fluidização rápida requerem alta velocidade de gás. As partículas comportam-se de maneira vigorosa e turbulenta. A transição do regime turbulento para a fluidização rápida se dá na velocidade de transporte da partícula, onde um grande número de sólidos deixa o leito pelo topo da coluna. A passagem para o transporte pneumático acontece quando a fase densa na base do leito desaparece e todas as partículas passam a ser arrastadas pelo fluido (BIANCHI; AQUINO, 2014; CARDOSO, 2008).

A partir do regime turbulento faz-se necessário um retorno das partículas para dentro do leito. Como em LFC's a operação de regime é a fluidização rápida, Silva e Aquino (2015) explicam que o retorno das partículas é um ciclo que se inicia da seguinte maneira: as partículas ascendem pelo *riser* e, ao deixá-lo, separam-se do fluido por um ciclone e descem pelo *downcomer*, tubo de descida. Em sequência, passam por uma válvula não mecânica de retorno para voltarem ao *riser*, completando o ciclo.

1.1 DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS VELOCIDADES DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO E TRANSIÇÃO

Em leitos fluidizados gás-sólido, quando a velocidade do gás excede a velocidade mínima de fluidização, u_{mf} , o leito fixo transforma-se em leito fluidizado incipiente.

Através da equação de Ergun que relaciona a queda de pressão em um leito de partículas como uma função da velocidade do gás, uma equação geral para estimar a u_{mf} a partir do número de Reynolds na condição de mínima fluidização foi desenvolvida (MONAZAM; SHADLE, 2011; YANG, 1999):

$$Re_{mf} \frac{d_p \cdot \rho_f \cdot u_{mf}}{\mu} \quad [Eq. 01]$$

O número de Reynolds na mínima fluidização é encontrado através da equação proposta por Yang (2003):

$$Re_{mf} = \sqrt{(C_1)^2 + C_2 \cdot Ar \cdot C_1} \quad [Eq. 02]$$

A Tabela 1 apresenta alguns valores para as constantes C_1 e C_2 bem como seus respectivos autores.

O número de Arquimedes, adimensional, também apresentado por alguns autores como número de Galileo, pode ser encontrado através a equação sugerida por Grace (1997):

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \quad [Eq. 03]$$

A literatura apresenta que a velocidade de transporte, u_{tr} , que caracteriza a passagem do regime turbulento para a fluidização rápida, pode ser calculada relacionando-se o número de Reynolds e Arquimedes, como mostra a Equação 4 proposta por Monazam e Shadle (2011):

$$Re_{tr} = a \cdot Ar^b \quad [Eq. 04]$$

Os números de Reynolds e Arquimedes podem ser obtidos através das Equações 1 e 3, respectivamente. Porém, na Equação 1, substitui-se u_{mf} por u_{tr} . A Tabela 2 apresenta os principais valores de a e b , válidos para a fluidização rápida.

Esses parâmetros podem ser determinados experimentalmente plotando o número de Reynolds por Arquimedes para cada tipo de partícula (MONAZAM; SHADLE, 2011).

Para distinguir os regimes de fluidização gás-sólido a literatura apresenta, comumente, a necessidade de determinar a velocidade de transição das partículas. Em leitos fluidizados circulantes ela depende da taxa de circulação dos sólidos e algumas outras propriedades do sistema (BAI et al. 1996).

Segundo Monazam e Shadle (2011) a velocidade de transporte pode ser obtida empiricamente em um LFC determinando-se o tempo necessário de esvaziamento do *riser*, depois de encerrar a recirculação de sólidos.

Em seu estudo, os autores utilizaram quatro partículas distintas em um LFC em estado estacionário com a circulação de sólidos ajustada de maneira que houvesse um carregamento máximo de partículas no *riser*.

Após o carregamento máximo, a alimentação foi encerrada e a velocidade superficial do gás foi mantida; então, um gradiente de pressão ao longo do *riser* foi medido como uma função do tempo (Figura 1).

Tabela 1 - Valores das constantes C_1 e C_2 apresentadas na Equação 2.

Autores	C_1	C_2
Wen e Yu	33,7	0,0408
Richardson	25,7	0,0365
Saxena e Vogel	25,3	0,0571
Babu et al.	25,3	0,0651
Grace	27,2	0,0408
Chitester et al.	28,7	0,0494

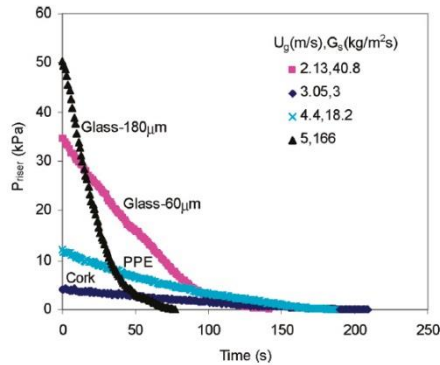
Fonte: Kunii; Levenspiel (1991).

Tabela 2 - Valores dos parâmetros a e b apresentados na Equação 4.

Autores	a	b
Lee e Kim	2,91	0,35
Bi e Fan	2,28	0,42
Adáñez et al.	2,07	0,46
Tsukada	1,80	0,46
Smolders e Bayen	1,75	0,46
Mori et al.	1,46	0,56
Perales et al.	1,41	0,48

Fonte: Grace (1997); Monazam; Shadle (2011).

Figura 1 - Variação da queda de pressão total do riser após a suspensão do fluxo de sólidos, mantendo a velocidade do gás.

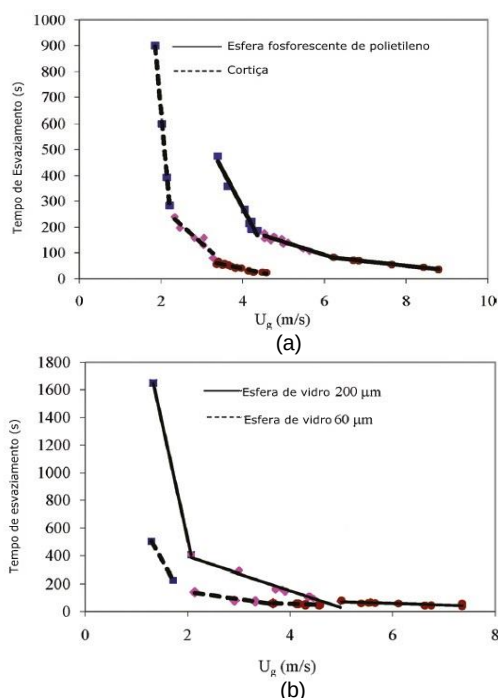


Fonte: Monazam; Shadle (2011).

Monazam e Shadle (2011) variaram a velocidade do gás e registraram o tempo necessário para que todas as partículas deixassem o leito. Posteriormente, construíram um gráfico (Figura 2) de tempo em função da velocidade superficial do gás.

A análise de regressão dos dados mostrou três regiões lineares para cada partícula. Separando as três regiões, Monazam e Shadle (2011) encontraram duas velocidades de transição.

Figura 2 - Tempo de esvaziamento do leito em função da velocidade de injeção do gás: (a) esfera de polietileno e cortiça, (b) esferas de vidro.



Fonte: Monazam; Shadle (2011).

Na primeira região de transição encontraram a velocidade de transporte, que marca o início da fluidização rápida. Na segunda encontraram a velocidade que define a fase homogênea ou transporte pneumático. Desta forma, os regimes de fluidização e a transição entre os regimes, bem como a velocidade de mínima fluidização, foram determinados.

Para melhor comparação com os dados teóricos, obtidos através de equações da literatura, o presente trabalho teve como objetivo a obtenção de dados experimentais que servissem de base para implementação em modelos de simulação a serem utilizados no *scale up* de sistemas, como a variação da queda de pressão do leito, a velocidade de transição entre os regimes e a velocidade mínima de fluidização dos três tipos de partículas.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

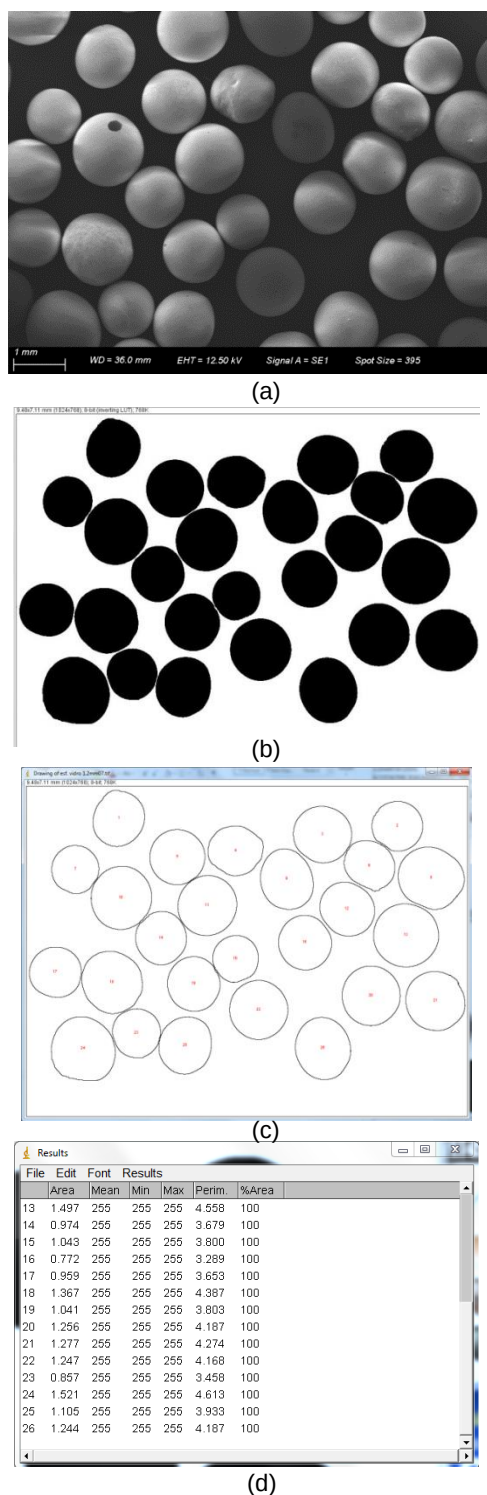
As partículas utilizadas neste estudo para simular o comportamento da cinza do carvão foram dois tipos de esferas de vidro e areia de fundição, compradas da Technoglass e disponibilizada por Unimin do Brasil, respectivamente.

Foram determinadas as massas específicas aparente, de *bulk* mediante a NBR 8630 (ABNT, 1984b) e a real, segundo a NBR 9745 (ABNT, 1987).

A esfericidade das partículas foi definida a partir de uma correlação indicada por Foust et al. (2013) em literatura. O procedimento de caracterização das amostras foi realizado em triplicata para cada material.

Para determinar o diâmetro médio das partículas foi utilizado o ImageJ, software que analisou as imagens obtidas por MEV (microscopia eletrônica de varredura).. A Figura 3 apresenta o MEV da maior partícula e sua aplicação no ImageJ.

Figura 3 - (a) Microscopia eletrônica de varredura da maior partícula (esfera de vidro), (b) aplicação do MEV no ImageJ seguido de tratamento da imagem, (c) reconhecimento de cada caractere, (d) resultados obtidos.

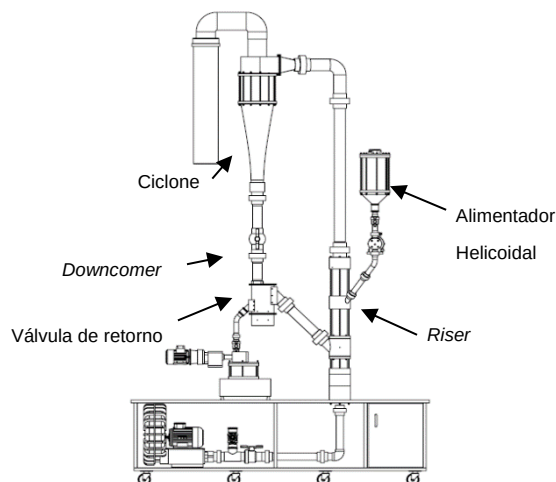


2.2 BANCADA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

A bancada experimental de LFC utilizada no estudo pertence ao núcleo de conversão energética limpa (NCEL). Está localizada no laboratório de captura de CO₂ da SATC. A bancada é apresentada

na Figura 4, e foi previamente descrita por Bianchi et al. (2013).

Figura 4 - Bancada de testes.



Fonte: Bianchi et al. (2013).

2.3 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

Para encontrar a velocidade mínima de fluidização das partículas foi inserida no *riser* uma quantidade de material até alcançar uma altura de 0,114m, valor do diâmetro interno do leito. Através do supervisor iFix, cada teste iniciou-se com uma rampa de aceleração sobre um ventilador radial responsável pela injeção de ar no interior do leito. Posteriormente a altura foi dobrada e o mesmo procedimento foi realizado. Para cada altura foram realizados testes em triplicata.

Durante a realização dos testes, dados de vazão do gás e pressão do *riser* foram exportados do FieldLogger, um módulo de leitura e registro de dados.

Os gráficos de velocidade de mínima fluidização foram construídos com dados de aceleração e desaceleração da entrada de ar, ou seja, foram coletados valores de pressão do *riser* e vazão do gás para fluidizar as partículas e para defluidizá-las.

Baseado nisso, o gráfico foi separado em regiões lineares onde o ponto de encontro entre a linha do regime borbulhante e do leito fixo na defluidização foi definido como o ponto de mínima fluidização. Posteriormente, uma média e um desvio padrão dos valores foram encontrados.

2.4 DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES DE TRANSPORTE

Para encontrar a velocidade de transporte entre os regimes de fluidização foram utilizados inventários de 9 e 10kg para a areia de fundição e 9kg para a esfera de vidro tipo 1 (menor esfera). Primeiro foi calculada a velocidade de transporte de ambas as partículas. A velocidade encontrada foi variada entre 10 e 12 vezes a u_{mf} para a esfera de vidro tipo 1, visto que para ocorrer a circulação das esferas no equipamento foi necessário um mínimo de 10 vezes a velocidade de mínima fluidização. Além disso, o máximo a ser alcançado foi conforme o limite de ΔP do transdutor de pressão (inferior a 100mbar).

Para os dois inventários da areia de fundição, a velocidade superficial foi manipulada entre 42 e 80 vezes a u_{mf} , seguindo os mesmos critérios para a esfera de vidro. Com os intervalos definidos, 20 ensaios foram realizados para cada inventário da areia de fundição e 5 ensaios para a esfera de vidro tipo 1.

Na realização dos ensaios da areia de fundição e esfera de vidro tipo 1, buscou-se obter um carregamento máximo de partículas no riser de forma a alcançar um leito denso e uma altura máxima de partículas no downcomer. A aeração da válvula *loop-seal* foi controlada para que não houvesse fluidização no *downcomer*, somente no *riser*. Ao alcançar um regime estacionário ou permanente, considerado condição ótima de trabalho, a aeração da válvula foi interrompida, cessando a recirculação de sólidos no riser. Através da injeção de ar no leito, as partículas foram arrastadas até alcançarem o ciclone e estagnarem no *downcomer*. O tempo que levou para que todas as partículas fossem transportadas foi registrado, bem como a variação de pressão no leito. Este procedimento foi repetido para todos os intervalos de velocidade superficial previamente definidos.

Inicialmente foi sugerido realizar o teste para as três partículas, porém foi observado que a esfera de vidro tipo 2 não obteve bom comportamento no equipamento, sendo necessárias vazões muito altas de gás para que ocorresse a circulação destas partículas, extrapolando o limite de pressão do sistema. A fim de obter melhores resultados, decidiu-se, então, variar o inventário da areia de fundição por ser a partícula de melhor desempenho no leito (Grupo B, conforme Geldart).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos na etapa de caracterização das partículas são apresentados na Tabela 3. Analisando a tabela, nota-se que a esfericidade dos três materiais é próxima de 100%. A massa específica real das partículas é próxima da massa específica real da cinza do carvão, 2300 kg/m³ (SABEDOT et al., 2011), confirmando sua aplicabilidade neste estudo.

Através da análise do diâmetro de cada partícula com o software ImageJ e da diferença de sua massa específica aparente com a do ar atmosférico, as partículas foram classificadas segundo os materiais particulados de Geldart. O diâmetro das partículas e sua classificação são apresentados na Tabela 4.

Esta classificação mostrou que as esferas de vidro, quando fluidizadas, apresentam comportamento irregular e são capazes de formar jorro e pistão mesmo em leitos profundos. Para que ocorra a fluidização destas esferas serão necessárias altas vazões de gás. A areia de fundição fluidiza bem com vigorosa ação e crescimento de bolhas. Durante a realização dos experimentos estas características puderam ser observadas.

Na etapa de determinação de perdas de carga do distribuidor em função da velocidade superficial de ar, foi obtida a curva apresentada na Figura 5.

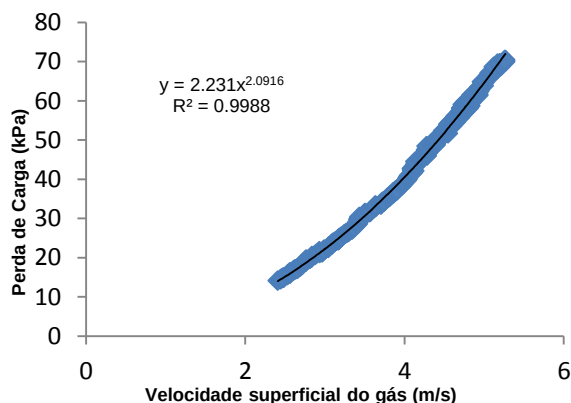
Tabela 3 – Resultados dos testes de massa específica aparente (ρ_{ap}), bulk (ρ_{bulk}), real (ρ_{real}) e esfericidade (Ψ).

Partícula	ρ_{ap} (kg/m ³)	ρ_{bulk} (kg/m ³)	ρ_{real} (kg/m ³)	Ψ (%)
Areia de Fundição	2263	1514	2643	77
Esfera de vidro tipo 1	2269	1530	2487,9	100
Esfera de vidro tipo 2	2225	1548	2485,6	94

Tabela 4 - Diâmetro e classificação dos materiais conforme os sólidos particulados de Geldart.

Partícula	Diâmetro (mm)	Classificação conforme Geldart
Areia de Fundição	0,2954	B
Esfera de vidro tipo 1	0,7538	D
Esfera de vidro tipo 2	0,1955	D

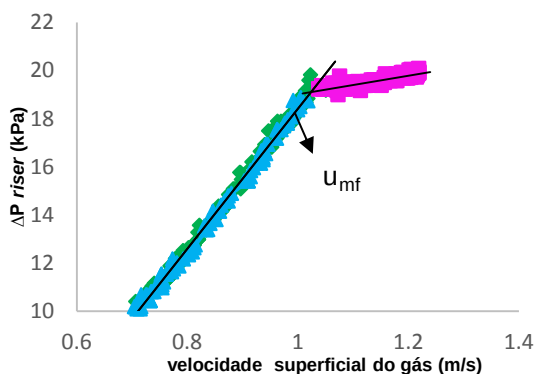
Figura 5 – Curva de perdas de carga do distribuidor de ar em função da velocidade superficial de injeção de ar.



Na equação apresentada na Figura 5, o valor de y corresponde à perda de carga encontrada no distribuidor de ar e o valor de x é a velocidade de ar correspondente.

Através da equação da curva obtida, a perda de carga do distribuidor de ar foi desconsiderada para cada velocidade superficial de ar nos testes de determinação da mínima fluidização das partículas e também nos testes de obtenção das curvas de variação de pressão do riser em função do seu tempo de esvaziamento. A Figura 6 ilustra um dos gráficos obtidos para a esfera de vidro 1,19mm, descontando a perda de carga do distribuidor.

Figura 6 – Mínima fluidização das esferas de vidro do tipo 2.



A Tabela 5 a seguir apresenta os resultados encontrados para cada partícula, tanto experimentais quanto teóricos.

As constantes C_1 e C_2 utilizadas para encontrar a velocidade de mínima fluidização teórica (Equação 2) foram as de Chitester et al. (apresentadas previamente na Tabela 1). Os resultados apresentaram muito boa concordância com a literatura. Os valores dos parâmetros a e b no cálculo da velocidade de transporte utilizados foram os valores propostos por Bi e Fan (Tabela 2).

Para encontrar os regimes de fluidização e as velocidades de transição, curvas de variação de pressão do riser por tempo foram construídas para cada ensaio, conforme Monazam e Shadle (2011). A Figura 7 apresenta uma das curvas obtidas para o ensaio de 9kg da areia de fundição.

Esta curva apresenta a variação de pressão do riser em função do tempo de esvaziamento. Quando o valor de ΔP é zero ou muito próximo de 0, o leito foi completamente ou parcialmente esvaziado. O comportamento dos gráficos foi semelhante para cada ensaio da areia de fundição e esfera de vidro tipo 1.

Variando a velocidade do gás e coletando tempos de esvaziamento do leito, obtiveram-se as Figuras 8 e 9

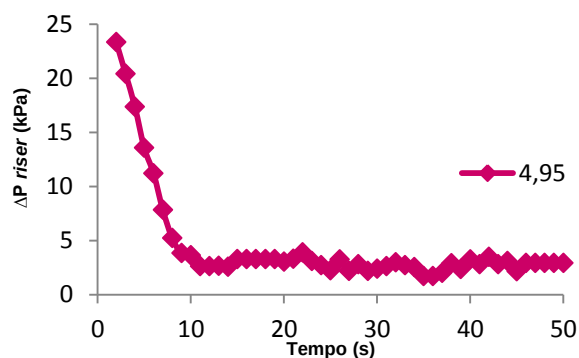
Figura 7 – Curva de ΔP_{riser} por tempo, utilizando areia de fundição, inventário de 9kg e velocidade superficial de $4,95m.s^{-1}$.


Tabela 5 – Resultados experimentais dos testes de mínima fluidização e valores teóricos.

Partícula	Altura do leito (mm)	Média dos valores (m/s)	Desvio Padrão	U_{mf} (m/s) experimental	U_{mf} (m/s) teórico
Areia de Fundição	0,114	0,0568	0,0090	0,0632	0,0941
	0,228	0,0695			
Esfera de Vidro 1	0,114	0,4069	0,0378	0,4336	0,4372
	0,228	0,4603			
Esfera de Vidro 2	0,114	1,0083	0,0600	0,9659	0,7726
	0,228	0,9234			

Figura 8 - Tempo necessário para as partículas abandonarem o leito em função da velocidade superficial de gás: (a) areia de fundição, inventário 9kg; (b) areia de fundição, inventário 10kg.

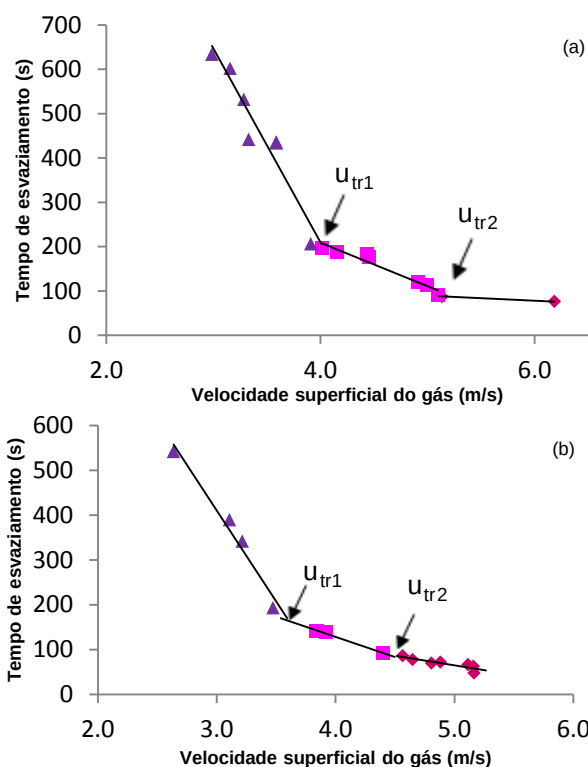
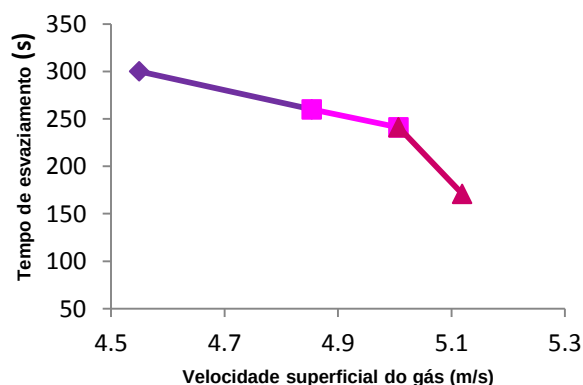


Figura 9 - Tempo necessário para as partículas abandonarem o leito em função da velocidade superficial de gás: esfera de vidro tipo 1, inventário de 9kg.



Na Figura 8 é possível identificar duas velocidades de transição, u_{tr1} que caracteriza o início da fluidização rápida e u_{tr2} , que marca o início do transporte pneumático. Conforme esperado, um aumento no inventário de sólidos resultou em um tempo maior para esvaziamento do leito. Percebe-se também que os gráficos ficaram semelhantes àqueles obtidos por Monazam e Shadle (2011), apresentados na Figura 5.

A Tabela 6 apresenta os valores das velocidades de transporte encontradas experimentalmente em comparação com as teóricas.

Tabela 6 – Resultados experimentais dos testes de mínima fluidização e valores teóricos.

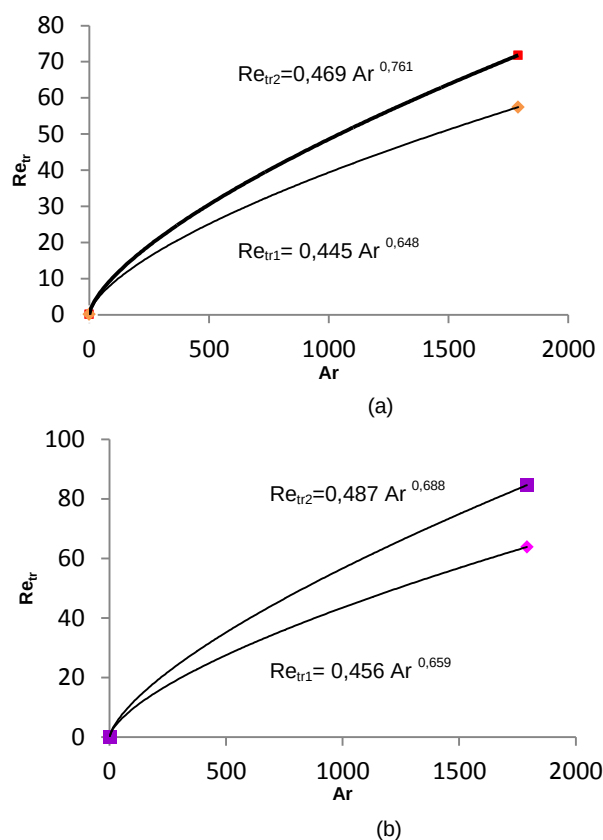
Partícula	U_{tr1} e U_{tr2} (m/s) experimentais	U_{tr} (m/s) Teórica	Desvio Padrão
Areia de Fundição	9kg: 3,6 e 4,5	3,54	0,042
	10kg: 4 e 4,5		0,325
Esfera de Vidro tipo 1	-	3,91	-
Esfera de Vidro tipo 2	-	4,45	-

Não foi possível encontrar valores experimentais de velocidades de transição entre os regimes para as esferas de vidro tipos 1 e 2, uma vez que o gráfico obtido com os ensaios da esfera de vidro tipo 1 não foi satisfatório, conforme visto na Figura 9. Para obter melhores resultados, faz-se necessário o uso de esferas com diâmetro menor, menos densas, uma vez que devido ao limite de pressão diferencial dos transdutores ser de 100mbar, não foi possível utilizar vazões de gás superiores. Dessa forma, um gráfico de tempo de esvaziamento versus velocidade superficial do gás não foi obtido para a esfera de vidro mais densa.

A velocidade de transporte teórica encontrada para a areia de fundição caracteriza a passagem do regime turbulento para a fluidização rápida. Ela aproxima-se da u_{tr1} experimental, que marca o início da fluidização rápida.

Através dos valores experimentais apresentados na Tabela 6 e com o uso da Equação 1, o número de Reynolds na condição de transporte foi calculado. A correlação obtida entre o número de Reynolds e Arquimedes para a areia de fundição é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Número de Reynolds experimental em função do número de Arquimedes para a areia de fundição: (a) inventário 9kg; (b) inventário 10kg.



As correlações de a e b são semelhantes, visto que trata-se da mesma partícula. A Tabela 7 compara os principais valores de a e b apresentados em literatura, válidos para a fluidização rápida, com os valores encontrados experimentalmente neste trabalho.

Tabela 7 - Parâmetros a e b apresentados na literatura e encontrados experimentalmente.

Autores	Correlações
Lee e Kim	$Re_{tr} = 2,91 Ar^{0,35}$
Bi e Fan	$Re_{tr} = 2,28 Ar^{0,42}$
Adánez et al.	$Re_{tr} = 2,07 Ar^{0,46}$
Tsukada	$Re_{tr} = 1,80 Ar^{0,46}$
Smolders e Bayen	$Re_{tr} = 1,75 Ar^{0,46}$
Mori et al.	$Re_{tr} = 1,46 Ar^{0,56}$
Perales et al.	$Re_{tr} = 1,41 Ar^{0,48}$
Neste trabalho – 9kg:	$Re_{tr1} = 0,45 Ar^{0,65}$
	$Re_{tr2} = 0,47 Ar^{0,67}$
Neste trabalho – 10kg:	$Re_{tr1} = 0,46 Ar^{0,66}$
	$Re_{tr2} = 0,49 Ar^{0,69}$

Fonte: Grace; Avidan; Knowlton (1997); Monazam; Shadle (2011).

4. CONCLUSÕES

Com o presente estudo verificou-se a aplicabilidade das esferas de vidro e da areia de fundição em substituição à cinza de carvão em leitos fluidizados circulantes.

A classificação de Geldart confirmou a areia de fundição como sendo a partícula de melhor desempenho no leito e a difícil fluidização das esferas de vidro (grupo D).

Operando com várias velocidades de injeção de ar no leito foi possível encontrar experimentalmente a velocidade de transição entre os regimes de fluidização para a areia de fundição, que estão relacionadas diretamente com o número de Reynolds e Archimedes.

Não foi possível encontrar valores experimentais de u_{tr} para as esferas de vidro, uma vez que por serem partículas do grupo D são grandes e densas, de difícil fluidização. Para fluidizá-las a ponto de promover a circulação de sólidos no leito são necessárias altas vazões de gás, o que não foi possível alcançar nesta pesquisa devido ao limite de pressão do equipamento.

Dessa forma, sugerem-se pesquisas futuras com esferas de menor diâmetro e com outras partículas pertencentes ao grupo B ou A, também usadas em leitos fluidizados circulantes. Para obtenção de melhores resultados seria aconselhável que o tamanho do *downcomer* e *riser* fosse superior ao atual, o que acarretaria em maiores valores de ΔP .

5. NOMENCLATURA

a - parâmetro, adimensional

Ar - número de Archimedes, adimensional

b - parâmetro, adimensional

C_1 - constante empírica, adimensional

C_2 - constante empírica, adimensional

d_p - diâmetro da partícula, m

g - aceleração gravitacional, $m.s^{-2}$

Re_{mf} - número de Reynolds em condições de mínima fluidização, adimensional

Re_{tr} - número de Reynolds em condições de transporte, adimensional

u_{mf} - velocidade de mínima fluidização, $m.s^{-1}$

μ - viscosidade do fluido, $kg.m^{-1}.s^{-1}$

ρ_f - massa específica do fluido, $kg.m^{-3}$

ρ_p - massa específica da partícula, $kg.m^{-3}$

6. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8630**: Carvão mineral: Determinação da densidade de carga. Rio de Janeiro, 1984b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9745**: Coque: Determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1987.

BAI, D.; SHIBUYA, N.; NAKAGAWA, N.; KATO, K. **Characterization of gas fluidization regimes using pressure fluctuations**. Powder Technology, v. 87, n. 2, p. 105-111, 1996.

BIANCHI, F. M.; AQUINO, T. F. **Bancada de leito fluidizado circulante a frio: experimentos e análise de dados**. 2014. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, Criciúma, 2014.

BIANCHI, F. M.; AQUINO, T. F.; KESTERING, D. A.; DALPONT, G.; MARCELLO, R. R.; NETO, J. M.; INDRUSIAK, M. L. S.; ZINANI, F.; WANDER, P. R. Bancada experimental para estudos de fluidização de combustíveis sólidos em sistemas de leito fluidizado circulante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 4, 2013, Gramado, **Anais...** Gramado: Centro de Eventos da FAURGS, 2013. p 20.

CARDOSO, C. R. **Arraste de partículas finas em um leito fluidizado e eficiência de coleta de um ciclone dipleg**. 2008. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

FOUST, A. S.; WENZEL L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

GRACE, J.R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M. **Circulating fluidized beds**. Londres: Chapman & Hall, 1997.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2ª ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.

MILIOLI, C. L. C. da C. **Simulação de escoamentos gás-sólido reativos em leitos fluidizados circulantes**. 2006. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MONAZAM, E. R.; SHADLE, L. J. S. Method and prediction of transition velocities in a circulating fluidized bed's riser. **I&EC Research**, Washington, v. 50, n. 4, p. 1921-1927, jan. 2011.

NITZ, M.; GUARDANI, R. Fluidização gás-sólido: fundamentos e avanços. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, p. 20-24, 2008.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7ª ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

SABEDOT, S.; SUNDSTRON, M. G.; BÖER, S. C.; SAMPAIO, C. H.; DIAS, R. G.; RAMOS, C. G. Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 3, 2011, Gramado, **Anais...** Gramado: Centro de Eventos da FAURGS, 2011. p. 15.

YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. Boca Raton: CRC Press, 2003.

YANG, W. C. **Fluidization, solids handling and processing**. 1ª ed. New Jersey: Noyes Publication, 1999.