

BALANÇO DE PRESSÃO EM UMA BANCADA EXPERIMENTAL OPERANDO EM REGIME DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Amanda LOPES¹; Thiago AQUINO¹; Flavio BIANCHI¹; Daniel KESTERING¹; Stéphanie LUDGERO²;

¹Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), ^aammandalopes@hotmail.com;

²Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ^cstephani.ludgero@gmail.com

RESUMO

A tecnologia de leito fluidizado circulante se destaca entre as tecnologias existentes para conversão de combustíveis sólidos e é indicada quando se trata de combustíveis que possuem elevados teores de cinzas em sua constituição, como os carvões minerais brasileiros. O objetivo deste trabalho foi realizar o balanço de pressão numa bancada experimental operando em regime de leito fluidizado circulante (LFC). Portanto, foram analisadas as variações de pressão em partes específicas do circuito (*riser*, *downcomer*, ciclone, válvula *loop-seal* e curva) variando os dados de velocidade superficial do gás, massa do inventário e o tipo e tamanho de partículas (areia de fundição e esferas de vidro). A partir dos dados de pressão nos diferentes pontos da bancada, balanços de pressão foram levantados a fim de subsidiar tomadas de decisão no controle do sistema em LFC, ou seja, determinar quais pontos necessitam de maior atenção para uma boa operação. Foi realizada a classificação das partículas e encontrou-se as velocidades de mínima fluidização. Os resultados experimentais foram comparados com dados disponíveis em artigos científicos e literatura especializada. Os resultados demonstraram uma boa concordância com a literatura em termos de velocidade de mínima fluidização e também do balanço de pressão. As maiores perdas de carga estão localizadas no *downcomer* e no *riser*, sendo estes os pontos de maior necessidade de controle de injeção de ar para a obtenção de um bom balanço de pressão.

Palavras-chave: Leito Fluidizado Circulante; Velocidade de Mínima Fluidização; Balanço de Pressão.

ABSTRACT

The circulating fluidized bed (CFB) technology stands out among existing technologies for solid fuels conversion and it is indicated when it comes to fuels that have high ash content in their constitution, such as Brazilian mineral coals. The objective of this work was to carry out the pressure balance in a bench scale circulating fluidized bed equipment. Therefore, it was verified the pressure variations in specific parts of the circuit (riser, downcomer, cyclone, loop-seal valve and curve) by varying the gas superficial velocity, mass of the inventory, type and size of particles (casting sand and glass beads). As of the pressure data in the different points of the bench, pressure balances were obtained in order to give support in the control of the LFC system, in other words, to determine which points need more attention for a good operation. It was performed the geldart classification for the particles and the minimum fluidization velocities were obtained. The experimental results were compared to data from journal and specialized literature. The results showed a good agreement with the literature in terms of minimum fluidization velocity and pressure balance. The largest losses of load are located in the downcomer and in the riser. These were the points of greatest need of air injection control in order to obtain a good pressure balance.

Key-Words: Circulating Fluidized Bed; Minimum Fluidization Velocity; Pressure balance.

1 INTRODUÇÃO

A operação de fluidização existe desde 1926 e foi inicialmente arquitetada para a gaseificação de carvão. Entretanto, somente a partir da década de 40, a técnica expandiu-se com a construção do primeiro leito fluidizado para craqueamento de

carvão e experimentou um acentuado desenvolvimento em muitas outras áreas (Kunii e Levenspiel, 1991). Atualmente os leitos fluidizados (LF) apresentam diversas aplicações industriais, como exemplo: sínteses e reações catalíticas, regeneração catalítica, combustão e gaseificação de carvão e biomassa.

Alguns setores da indústria utilizam o sistema de leito fluidizado borbulhante (LFB) para a geração de calor, como a indústria cerâmica, bem desenvolvida na região do sul catarinense. A tecnologia de LFC se destaca entre as tecnologias existentes para conversão de combustíveis sólidos. É indicada principalmente quando se trata de combustíveis que possuem elevados teores de cinzas em sua constituição, como os carvões minerais brasileiros. O LFC, quando bem operado, apresenta-se como uma opção de alta eficiência não somente para a geração de calor, mas também para a geração de gás combustível quando aplicado em sistemas de gaseificação.

Em um LFC, o fluxo de gás-sólido no *riser* e a taxa de circulação de sólidos são dependentes das quedas de pressão nas diferentes seções. Para obter uma distribuição do inventário de sólidos, é necessário o balanço de massa, e o equilíbrio global de pressão. Além disso, um modelo de equilíbrio de pressão com submodelos razoáveis para todas as partes do LFC é necessário para analisar o comportamento do sistema e fornecer informações para os princípios de projeto e operação (Kim e Kim, 2000).

1.1 TECNOLOGIA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Um sistema de LFC consiste em um leito de partículas movimentado em regime de fluidização rápida e inserido em uma coluna ascendente de sólidos e gás (*riser*), um separador gás-sólido (ciclone), um tubo vertical para a descida de sólidos (*downcomer*) e um sistema de recirculação de partículas (Basu, 2006).

A supervisão da variação da pressão nos LFC constitui um aspecto importante na verificação do regime fluidodinâmico de operação. As técnicas de monitoramento visam o conhecimento de parâmetros importantes, como o início da fluidização (velocidade mínima de fluidização) ou a determinação da transição de um regime de contato para outro (Fonseca, 2009).

A distribuição mássica dos sólidos nos componentes de um sistema operando em LFC é um parâmetro comandado pelo balanço de pressão promovido pelo escoamento gás-sólido ao longo do circuito de fluidização. Algumas pesquisas focam seus estudos no balanço de pressão no LFC. Kim *et*

al. (2002) analisou o perfil de pressão estática em um sistema em escala piloto somente com partículas de areia. O resultado encontrado foi que o inventário total de sólidos e a velocidade de fluidização do gás afetam consideravelmente a distribuição de sólidos, e assim, a queda de pressão nos diferentes componentes do LFC.

1.2 PERDAS DE CARGA E BALANÇO DE PRESSÃO

Em um sistema operando com o LFC, as pressões em um ciclo devem ser equilibradas para uma operação estável. O equilíbrio de pressões do circuito pode ser expresso como (Kim e Kim, 2000):

$$\Delta P_{dc} \cong \Delta P_{ls} + \Delta P_r + \Delta P_c \quad [\text{Eq. 1}]$$

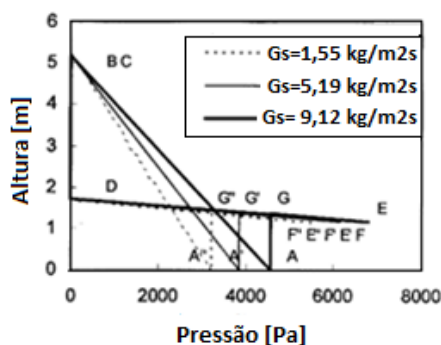
A Equação 1 indica que a perda de carga no *downcomer* (acima do ponto de aeração) e é parte dependente do balanço de pressões, que é aproximadamente igual aquele encontrado no restante dos componentes do circuito (válvula de reciclo, *riser* e ciclone).

Perdas de carga através de diferentes seções do LFC variam com mudanças na taxa de aeração na *loop-seal*. O fluxo de sólidos aumenta com a taxa de aeração na válvula, então, a perda de carga no *riser* aumenta com o incremento da taxa de aeração na *loop-seal*. Para uma dada aeração, a perda de carga no *riser* também aumenta com a velocidade do gás no *riser* (Basu e Cheng, 2000).

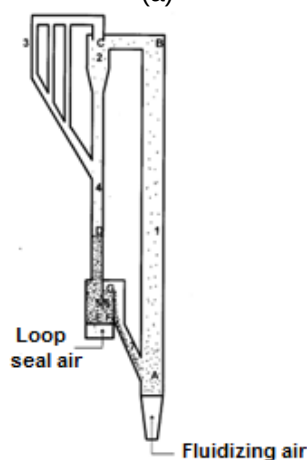
A perda de carga através do *downcomer* é o resultado combinado da altura dos sólidos e da velocidade relativa do gás-sólido naquele mesmo ponto. Ao aumentar a taxa de aeração, a velocidade também aumenta, mas a altura de sólidos no *downcomer* diminui.

A Figura 1 (a) mostra as perdas de carga em todo o sistema e sua mudança em diferentes fluxos de sólidos (G_s). É possível verificar que um aumento do fluxo de sólidos (a partir do aumento da velocidade superficial no *riser*) reflete em uma maior pressão no *downcomer* e no *riser*. A Figura 1 (b) mostra a bancada de LFC utilizada por Basu e Cheng (2000).

Figura 1 - a - Perfil de pressão ao longo de um circuito LFC em diferentes taxas de circulação de sólidos; b – Bancada de LFC.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Basu e Cheng, (2000).

Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo obter um balanço de pressão em uma bancada de LFC a fim de apontar os pontos que demandam maior controle para a boa operação do sistema.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento de LFC pertence ao núcleo de conversão energética limpa (NCEL), e está localizado no laboratório de captura de CO₂ da SATC.

2.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Como primeiro passo para a caracterização das partículas estudadas (esferas de vidro e areia de fundição), foram realizados ensaios para determinar as massas específicas empregando as normas DNER-ME 093/094 e NBR 9746 para massa específica real e aparente, respectivamente. Para

determinar a massa específica de *bulk* baseou-se na norma cancela ASTM D167, na qual o LAEC está desenvolvendo o procedimento. A esfericidade foi definida a partir de uma correlação indicada por Foust et al. (1982) a partir da medição da porosidade dos leitos fixos.

Os diâmetros médios das partículas foram obtidos por análise de imagem empregando o software Image J 1.48v para tratamento das imagens. A Figura 2 foi obtida em um microscópio eletrônico de varredura (MEV ZEISS EVO MA10 com EDS Bruker QUANTAX). Primeiramente a imagem original foi tratada, aplicando ferramentas do próprio programa, conforme Figura 3 (a), sendo então removidas as partículas sobrepostas ou incompletas, resultando na Figura 3 (b).

Figura 2 - Microscopia eletrônica de varredura da partícula esfera de vidro 1 (0,754 mm).

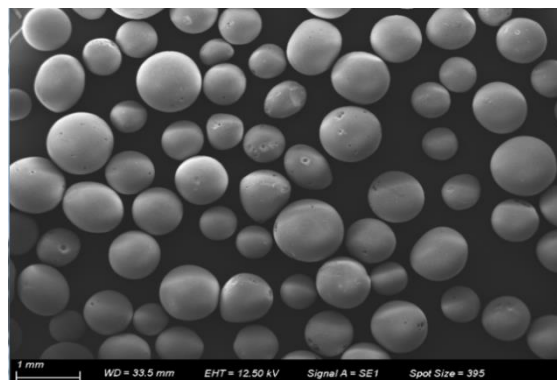
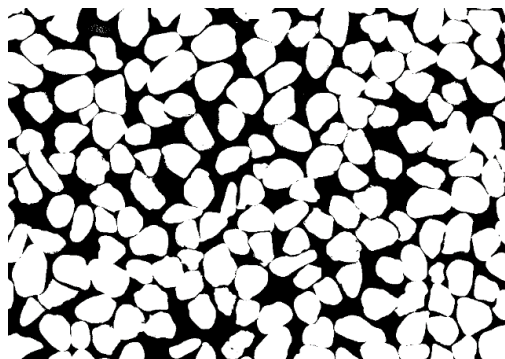
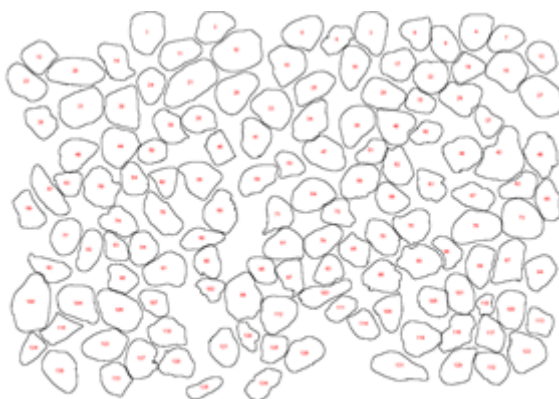


Figura 3 - Partículas de areia de fundição no software Image-J: a - imagem convertida para binária; b - polígonos formados a partir da imagem binária.



(a)



(b)

O *software* identifica os polígonos formados e mede a área de cada partícula encontrada, o que torna possível calcular o diâmetro médio das partículas. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios realizados, caracterizando as partículas que são utilizadas nos testes.

Tabela 1 - Características das partículas utilizadas.

Amostra	Diâmetro da partícula [mm]	Massa Esp. Bulk [kg/m³]	Massa Esp. Aparente [kg/m³]	Massa Esp. Real [kg/m³]	Esfericidade [---]	Fração de vazios [---]	Classificação (Geldart, 1973)
Esferas de vidro 1	0,754	1530	2269	2487,9	0,94	0,3856	D
Esferas de vidro 2	1,195	1548	2225	2485,6	1,00	0,378	D
Areia de fundição	0,295	1514	2263	2643,0	0,77	0,368	B

2.2 TESTES DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

Para a determinação das velocidades de mínima fluidização foram adotadas as indicações propostas por Kunii e Levenspiel (1977), a partir da perda de carga medida no leito quando submetido a variações de velocidade do gás de fluidização.

Os testes foram realizados variando o diâmetro das partículas e as alturas de leito. Foram utilizadas para medição de perda de carga no leito, tomadas de pressão localizadas abaixo do distribuidor de ar e uma tomada de pressão localizada acima do leito de partículas. Desse modo, foi possível encontrar a perda de carga do leito (Bianchi e Aquino, 2014).

Utilizou-se um *software* de supervisão, onde cada teste foi iniciado a partir de uma rampa de aceleração em um ventilador radial, que insufla ar na base do leito. Inseriu-se um valor máximo e mínimo de vazão, sendo a máxima um pouco acima da velocidade de mínima fluidização teórica e também o tempo necessário para o desenvolvimento desta rampa. Com estes valores foi possível gerar uma curva de aceleração e outra de desaceleração para cada teste. As vazões de ar foram medidas utilizando um dispositivo de medição de tipo placa de orifício instalada na linha de entrada da câmara plena.

2.3 VELOCIDADE DE TRANSPORTE

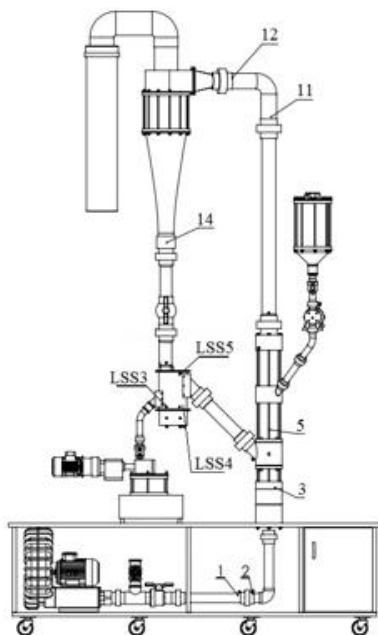
A partir de um valor crítico para a velocidade superficial do gás em um LF ocorre uma significativa saída de partículas do leito, exigindo a realimentação de sólidos para a manutenção do regime. Essa velocidade crítica é conhecida como velocidade de transporte, u_{tr} , que define a velocidade do gás na qual ocorre a transição de um regime turbulento para um regime de fluidização rápida, e que pode ser prevista através da Equação 2 (Bi e Zhu,1995).

$$u_{tr} = \frac{2,28 Ar^{0,419} \mu}{d_p \rho_g} \quad [Eq. 2]$$

2.4 BALANÇO DE PRESSÃO

Para a realização do balanço de pressão no sistema foi necessário inicialmente encontrar as perdas de carga em alguns componentes do circuito (*riser*, ciclone, *downcomer*, curva e válvula *loop-seal*). A Tabela 2 apresenta as tomadas de pressão correspondentes a partes importantes do equipamento de LFC, conforme Figura 4.

Figura 4 - Equipamento de LFC com as tomadas de pressão.



Para encontrar os valores de perda de carga no *riser* e no *downcomer* utilizaram-se transdutores de pressão diferentes. Para o restante dos componentes utilizou-se manômetros em U de coluna d'água. Estes manômetros medem a diferença de pressão em pontos específicos enquanto o sistema operou no estado estacionário em regime de fluidização circulante.

Para a realização dos testes foram definidos os inventários e as velocidades de ar inseridas no *riser*. Após a estabilização do sistema, os dados obtidos, principalmente os de perda de carga nos pontos selecionados, foram coletados. A partir dos dados de perda de carga e a Equação 1, foram levantados os balanços de pressão na bancada operando em regime de LFC.

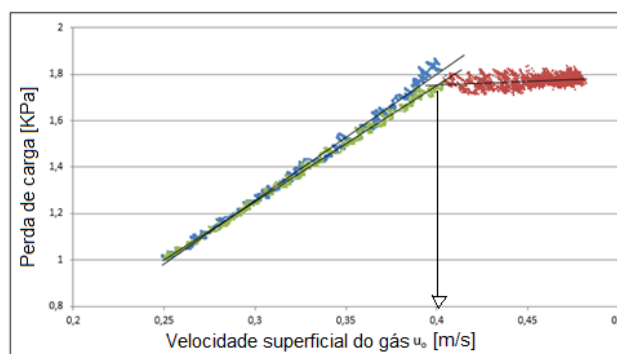
Tabela 2 - Tomadas de pressão utilizadas para a realização do balanço de pressão.

Item	Tomadas de pressão
<i>Riser</i>	3 ao 11
Distribuidor	03 ao 05
Curva	11 ao 12
Ciclone	12 ao 14
<i>Downcomer</i>	14 ao LSS3
<i>Loop-seal</i>	LSS4 ao LSS5

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os valores de velocidade de mínima fluidização foram encontrados após testes utilizando o diagrama queda de pressão *versus* velocidade. A Figura 5 apresenta um exemplo da análise gráfica para a determinação da U_{mf} .

Figura 5 - Método utilizado para a determinação da velocidade de mínima fluidização.



Os dados foram compilados e analisados, sendo possível a determinação das U_{mf} para as três partículas estudadas, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados de velocidade de mínima fluidização obtidos experimentalmente.

Partícula [mm]	Altura de leito L [m]	Velocidade de mínima fluidização U_{mf} [m/s]
0,754	0,114	0,4054
	0,228	0,4513
Média		0,4284
1,195	0,114	1,0391
	0,228	0,9258
Média		0,9825
0,295	0,114	0,0568
	0,233	0,0695
Média		0,0632

Para a verificação e comparação de dados experimentais com a literatura, são utilizados os dados de número de Reynolds de mínima fluidização, a partir do cálculo empregando a Equação 3, conforme Yang, (2003):

$$Re_{mf} = \frac{(U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu} = [C_1^2 + C_2 Ar]^{0.5} - C_1 \quad [Eq. 3]$$

O número de Arquimedes é definido por:

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2} \quad [Eq. 4]$$

Tabela 4 - Valores de U_{mf} obtidos através de equações conforme Yang (2003).

Referência	C_1 [-]	C_2 [-]	d_p [mm]	U_{mf} [m/s]	$U_{mf(exp.)}/U_{mf(lit.)}$ [-]
Experimental	-	-	0,754	0,428	-
			1,195	0,982	-
			0,295	0,063	-
Chitester et al. (1984)	28,7	0,0494	0,754	0,434	0,986
			1,195	0,733	1,340
			0,295	0,073	0,860

A partir da Tabela 4 é possível afirmar que as constantes propostas por Chitester *et al.* (1984) foram as que melhor se adequaram aos resultados experimentais para as partículas estudadas. Isso foi comprovado pelos valores da razão entre a velocidade de mínima fluidização experimental pela velocidade de mínima fluidização da literatura ($U_{mf(exp.)}/U_{mf(lit.)}$) mais próximos a 1. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Bianchi e Aquino (2014).

A Tabela 5 apresenta os inventários de sólidos utilizados nos testes e as Tabelas 6 e 7 demonstram as perdas de carga medidas em pontos específicos do sistema. Obteve-se a perda de carga da placa distribuidora, medindo o ΔP com o leito vazio, para posteriormente descontar da perda de carga do riser enquanto estiver com partículas. Nos testes, variou-se a velocidade do gás, relacionando este valor com a velocidade de mínima fluidização de cada partícula.

Os testes realizados com as esferas de vidro maiores (Partícula 2) foram desconsiderados, pois os resultados para o balanço de pressão não se mantiveram estáveis. Isso, provavelmente, se deve ao fato de se enquadrar como partícula do grupo D da classificação de Geldart, jorráveis, onde há uma

3.1 PERDAS DE CARGA E BALANÇO DE PRESSÃO

maior dificuldade de fluidização, ocasionando também uma maior instabilidade do sistema.

Além disso, durante a operação da bancada, estas partículas circulavam com dificuldade, na qual necessitavam de vazões maiores para fluidização

em regime circulante, extrapolando a pressão máxima permitida pelos dispositivos utilizados. A partícula 1, apesar de também ser classificar no grupo D, está mais próxima do grupo B, permitindo uma melhor operação.

Tabela 5 - Massas de sólidos utilizados nos testes.

Partícula 1	(kg)	Partícula 3	(kg)
Inventário 1	10,32	Inventário 2	10,00
Inventário 2	9,26	Inventário 2	9,00

Tabela 6 - Perdas de carga localizadas em pontos específicos do sistema utilizando areia de fundição (0,295 mm).

Partícula 3 - Inventário 1				
Velocidade	56,1U _{mf}	66,2U _{mf}	80,5U _{mf}	84,5U _{mf}
Perda de carga [Pa]				
Riser	1353,95	1376,34	1643,15	1619,91
loop-seal	1274	1372	1430,8	1568
Curva	39,2	29,4	29,4	39,2
Ciclone	137,2	176,4	235,2	235,2
Downcomer	2544,01	2737,83	3089,22	3183,3
Partícula 3 - Inventário 2				
Velocidade	55,3U _{mf}	68,6U _{mf}	73,1U _{mf}	82U _{mf}
Perda de carga [Pa]				
Riser	629,18	956,69	1046,91	961,37
loop-seal	1352,4	1352,4	1372	1411,2
Curva	29,4	29,4	29,4	29,4
Ciclone	176,4	196	186,2	166,6
Downcomer	2018,47	2415,77	2486,29	2567,54

Tabela 7 - Perdas de carga localizadas em pontos específicos do sistema utilizando esferas de vidro 1 (0,754 mm).

Partícula 1				
Inventário 1		Inventário 2		
Velocidade	10,2U _{mf}	11,2U _{mf}	10U _{mf}	11U _{mf}
Perda de carga [Pa]				
Riser	629,176	1619,907	3091,009	3029,605
loop-seal	1352,4	1568	147	98
Curva	29,4	39,2	78,4	88,2
Ciclone	176,4	235,2	156,8	186,2
Downcomer	2018,465	3183,302	3291,672	3503,953

Avaliando os resultados, percebe-se que as maiores perdas de carga foram localizadas no *riser*, *downcomer* e *loop-seal*. De modo geral, conforme esperado, as perdas de carga aumentam com a elevação da velocidade superficial do gás. Um aumento desta velocidade ocasiona um transporte

maior das partículas, ocasionando um aumento da queda de pressão. Isso ocorre principalmente no *downcomer*, onde há um acúmulo maior das partículas, e se trabalha com leitos moventes que muito se aproximam de leitos fixos, tendo alto grau de obstrução aos gases.

A perda de carga através do *downcomer* é um resultado combinado da altura dos sólidos e da velocidade relativa do gás naquele ponto. A velocidade aumenta com o aumento da taxa de aeração, mas a altura de sólidos no tubo diminui.

A válvula *loop-seal* também apresentou valores altos de perda de carga, devido ao acúmulo de partículas nessa região. Pontos como ciclone e curva não apresentaram valores significativos de perdas de carga, devendo-se apenas alertar a prevenção ao desgaste destes itens.

As Tabelas 8 e 9 mostram os balanços de pressão realizados na bancada de LFC. Foram considerados somente os testes que apresentaram diferenças inferiores a 10% ao realizar o balanço de pressão no sistema.

Tabela 8 - Balanço de pressão na bancada de LFC com diferentes velocidades, utilizando a partícula 3.

Partícula 3		Balanço de pressão		
Inventário	Velocidade	ΔP_{dc} [Pa]	$\Delta P_{ls} + \Delta P_r + \Delta P_c + \Delta P_{curva}$ [Pa]	Diferença (%)
1	56,1U _{mf}	2544,007	2804,348	9,28
	66,2U _{mf}	2737,826	2954,138	7,32
	80,5U _{mf}	3089,221	3338,549	7,47
	84,5U _{mf}	3183,302	3462,307	8,06
2	55,3U _{mf}	2018,466	2187,377	7,72
	68,6U _{mf}	2415,767	2534,498	4,68
	73,1U _{mf}	2486,298	2634,513	5,62
	82U _{mf}	2567,541	2568,572	0,04

Tabela 9 - Balanço de pressão na bancada de LFC com diferentes velocidades, utilizando a partícula 1.

Partícula 1		Balanço de pressão		
Inventário	Velocidade	ΔP_{dc} [Pa]		Diferença (%)
1	10,2U _{mf}	2949,617	3278,481	9,98
	11,2U _{mf}	3309,039	3186,679	3,84
2	10U _{mf}	3291,672	3473,209	5,22
	11U _{mf}	3503,953	3402,005	2,99
	11,6U _{mf}	3147,637	3094,691	1,71

Quando o *riser* opera com alta velocidade superficial do gás, a taxa de transferência de sólidos para o ciclone e *downcomer* também aumenta. Se não houver um aumento na aeração da *loop-seal*, a taxa de retorno de sólidos será menor que a que sai do *riser*. Então, poderá ocorrer um desbalanceamento na taxa de fluxo de sólidos, quebrando o balanço das sessões do circuito.

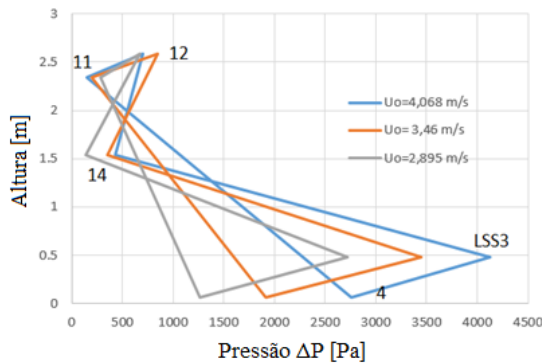
A quebra de balanço acontece quando combinado baixa velocidade superficial do gás no *riser* com alta aeração na *loop-seal*. Nessa condição a altura de sólidos no *downcomer* diminui para um ponto que o ar da válvula toma o caminho de menor

resistência, voltando para o ciclone, resultando na diminuição da eficiência do ciclone.

Para os resultados das Tabelas 8 e 9, onde não ocorreu a quebra do balanço de pressão, pode-se afirmar que os dados experimentais obtidos se ajustaram com a Equação 1.

Para a comparação com a literatura, formou-se um gráfico da altura do sistema pela pressão em diferentes pontos, Figura 6.

Figura 6 - Perfil de pressão ao longo de um circuito LFC em diferentes velocidades de gás.



Os resultados encontrados estão de acordo com os apresentados por Basu e Cheng (2000), onde os maiores valores de pressão foram encontrados na saída do *downcomer*, seguido do ponto de pressão medido na base do *riser*. Observou-se também que as pressões no *downcomer* e no *riser* ofereceram as maiores diferenças com o incremento da velocidade superficial do gás. Isso também foi observado nos estudos realizados por Basu e Cheng (2000).

4 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível chegar às seguintes conclusões:

- As velocidades de mínima fluidização encontradas nos experimentos tiveram boa concordância com a literatura, quando comparados seus valores com as velocidades de mínima fluidização encontradas a partir das constantes empíricas de Chitester *et al.* (1984).
- Para um determinado inventário de sólidos, as partículas são distribuídas principalmente no *riser*, no *downcomer* e na válvula *loop-seal*, sendo esta distribuição averiguada mediante a presença do perfil típico de pressão no circuito do sistema de LFC.
- As maiores perdas de carga foram encontradas no *downcomer*, seguido do *riser* e da *loop-seal*, sendo estes os pontos que se deve dar maior atenção para uma boa operação do sistema.
- A bancada de LFC satisfaz a equação do balanço de pressão, apresentando

também boa concordância com o comportamento apresentado na literatura.

5 NOMENCLATURA

ΔP [Pa]: Perda de carga

μ [kg/ms]: Viscosidade dinâmica do fluido

u_o [m/s]: Velocidade superficial do gás

d_p [m]: Diâmetro médio das partículas

ρ_g [kg/m³]: Massa específica do fluido

ρ_p [kg/m³]: Massa específica da partícula

ϵ_m [-]: Porosidade em leito fixo

ϵ_{mf} [-]: Porosidade em um leito em condições de mínima fluidização

ΔP_{dc} [Pa]: Perda de carga no *downcomer*

ΔP_{ls} [Pa]: Perda de carga na *loop-seal*

ΔP_r [Pa]: Perda de carga no *riser*

ΔP_c [Pa]: Perda de carga no ciclone

Ar [-]: Número de Arquimedes

Re_{mf} [-]: Número de Reynolds da partícula na condição de mínima fluidização

U_{mf} [m/s]: Velocidade de mínima fluidização

$C1$ e $C2$ [-]: Constantes empíricas recomendadas por vários autores conforme indicado por Yang (2003)

g [m/s²]: Aceleração da gravidade.

6 REFERENCIAS

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Boca Raton: CRC: Taylor e Francis, 2006. 473 p.

BASU, P.; CHENG, L. **An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed**. Institution of Chemical Engineers, 2000.

BI, H. T.; ZHU, J. **Regime transitions affecting gas-solids suspensions and fluidized-beds**.

Chemical Engineering Research & Design, Vol.73, No.2, 154-161, 1995.

BIANCHI, F. M.; AQUINO, T. F. **Bancada de leito fluidizado circulante a frio: experimentos e análises de dados.** Faculdade SATC – Engenharia mecânica, 2014.

CHITESTER, D. C.; KORNOSKY, R. M.; FAN, L. S.; DANKO, J. P. **Characteristics of fluidization at high pressure.** ChemEngSci 39;253–261, 1984.

FONSECA, O. L. C. **Estudo preliminar da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido de um leito fluidizado circulante através da análise dos sinais dinâmicos de pressão.** Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 120 p. Dissertação (Mestrado), 2009.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMB, C. W.; MANAUS, L.; ANDERSON, L. B. **Princípio das operações unitárias, segunda edição.** LTC, Rio de Janeiro, p. 670, 1982.

GELDART, D. **Types of gas fluidization.** Powder Technology 7 (1973) p.285-292.

KIM, S. W.; KIM, S. D. **Effects of particle properties on solids recycle in loop-seal of acirculating fluidized bed.** Powder Technology 124. Taejon, 305-701, South Korea, 2000.

KIM, S. W.; KIM, S. D.; Lee, D. H. **Pressure balance model for circulating fluidized beds with a loop-seal.** Ind. Eng. Chem., v.41, n.1, p. 4949-4956, 2002.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering.** 2 ed. Newton (MA): Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p.

YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems,** CRC Press, New York, p. 861, 2003.