

ESTUDO DA VÁLVULA LOOP-SEAL EM UM SISTEMA OPERANDO COM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Alonso Fabricio Oliveira da SILVA, Thiago Fernandes de AQUINO^a; Flavio Michels BIANCHI

Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), ^athiago.aquino@satc.edu.br

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de uma válvula não mecânica do tipo loop-seal em um sistema de leito fluidizado circulante (LFC), realizando experimentos em uma bancada de fluidização a frio, medindo o fluxo mássico através no standpipe a fim de verificar as faixas mais apropriadas para sistemas de combustão e gaseificação operando em LFC. Este estudo consistiu em variar a aeração de gás na válvula loop-seal e no riser. Além disso, foram avaliadas as massas de inventário, o efeito da pressão de injeção, além da influência do tamanho de partículas sobre o fluxo de sólidos no sistema. As partículas empregadas foram esferas de vidro e areia de fundição, com diâmetros próximos de cinzas produzidas a partir da conversão de combustíveis sólidos em sistemas térmicos. Os dados experimentais obtidos nas condições de maior estabilidade do sistema estiveram dentro da faixa de fluxo sugerida pela literatura. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que o fluxo de massa no standpipe aumentou à medida que as velocidades de injeção de ar na válvula aumentaram e que a câmara de suprimentos apresentou maior efeito sobre o fluxo de massa em comparação com a câmara de reciclo. Este fluxo aumentou quando aplicada uma menor pressão de injeção de ar na válvula, menor tamanho de partículas empregadas e maior inventário dentro do sistema. Os resultados encontrados para a constante experimental, que iguala o fluxo teórico ao experimental, mostraram que ela varia proporcionalmente com a velocidade de aeração no riser, com a quantidade de partículas no sistema, e com o tamanho de partículas utilizadas.

Palavras-chave: loop-seal, leito fluidizado circulante, bancada de fluidização a frio, fluxo mássico, constante de proporcionalidade experimental.

ABSTRACT

The objective of the present work was to study the behavior of a non mechanical valve type loop-seal in a cold flow circulating fluidized bed system. Experimental procedures were carried out to measure the mass flux through the standpipe and verify the better mass flux range to combustion and gasification systems operating in CFB. For this purpose it was varied the air flow rate in the loop-seal and riser. Furthermore, it was evaluated the particle inventory, the effect of the air injection pressure and the particle size over the solids mass flux in the system. The particles performed in this study were glass bead and cating sand with similar diameters of ashes produced from solid fuels conversion in thermal systems. The experimental data obtained in the conditions of greater stability of the system were within the flow range suggested by the literature. From the results obtained it was possible to verify that the mass flow in the standpipe increased as the air injection velocities in the valve increased and that the supply chamber had a greater effect on the mass flow compared to the recycle chamber. This flow increased when applied a lower air injection pressure to the valve, smaller particle size employed and greater inventory within the system. The results found for the experimental constant, which equals the theoretical to experimental flow, showed that it varies proportionally with the aeration velocity at the riser, with the amount of particles in the system, and with the particle size used.

Key-Words: loop-seal, circulating fluidized bed, cold flow fluidization bench, mass flux, experimental proportionality constant.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de LFC vem sendo aplicada comercialmente em diversos tipos de reatores para combustão, gaseificação de carvão e reatores catalíticos (Kim, 2002). Atualmente há reatores de leito fluidizado que conseguem produzir acima de

100MWe, como o de Yeosu, na Korea do Sul, que produz 329MWe com a combustão de carvão.

Injetando um fluido através de partículas sólidas, estas chegam a um estado de fluidez, comportando-se como um líquido, caracterizando-se como um leito fluidizado. Este estado tem alguns

regimes característicos: mínima fluidização, borbulhante e circulante. Este projeto trabalhará sob condições de regime circulante, pois é nele que a atuação da válvula *loop-seal* é crucial.

O regime de LFC faz com que as partículas tenham um comportamento turbulento, sendo este provocado através da injeção de um fluido com alta velocidade em seu meio. As partículas circulam pelo sistema, começando pela ascensão em um tubo comumente chamado de *riser*. Ao deixar o *riser* as partículas são separadas do fluido a partir de um ciclone e entram em um tubo descendente denominado *standpipe* ou *downcomer*. Na sequência do *standpipe* uma válvula não mecânica de reinjeção é instalada visando a recirculação das partículas para o *riser*, completando o ciclo. Este trabalho teve como objetivo estudar o controle de uma válvula do tipo *loop-seal* e o efeito que ela tem sobre o sistema. Modificando a variável vazão de ar, pode-se verificar as alterações sobre as outras variáveis do processo, como perdas de carga e vazão mássica. Como esta válvula não possui componentes móveis, a interação da mesma com o sistema é através de dois meios (Grace, 1997): em modo automático onde o fluxo só é alterado pelo formato construtivo da válvula; ou com o fluxo variando através de injeção de gás na válvula.

Esta vazão de ar na válvula é parte determinante no processo, pois leva às condições ótimas em termos de vazão mássica de sólidos a serem reinjetadas no *riser*.

1.1 LOOP-SEAL

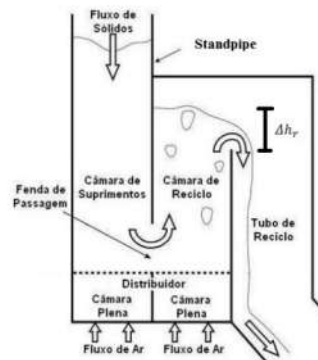
Segundo Basu (2006) “Não é exagero dizer que a *loop-seal* é o coração da planta de LFC”. Em 1996 a *loop-seal* foi empregada com sucesso em um reator de LFC na China, usado comercialmente para combustão de óleo de xisto (Han, 2007).

Esta é uma válvula não mecânica, o que a torna barata, de fácil fabricação e montagem, e suporta as condições adversas do LFC. Existem outras válvulas não mecânicas utilizadas atualmente, como as válvulas em L, J e V. A escolha da *loop-seal*, também chamada de U, deve-se ao selo que ela proporciona, impedindo que os gases e partículas do *riser* sigam o caminho inverso ao desejado.

Como pode ser visto na Figura 1, a *loop-seal* é composta por duas seções: câmara de suprimento e câmara de reciclo. A câmara de suprimentos liga o *standpipe* à câmara de reciclo. Os sólidos vindos do *standpipe* passam por esta câmara, e através de uma

fenda horizontal, chegam à câmara de reciclo. Entre as duas câmaras, há uma divisão, uma parede que separa as duas câmaras, deixando apenas uma pequena passagem ligando-as.

Figura 1: Válvula *loop-seal* (Basu, 2009)



Entre as duas câmaras, há uma divisão, uma parede que separa as duas câmaras, deixando apenas uma pequena passagem ligando-as. Na câmara de reciclo, os sólidos são novamente fluidizados, criando um tipo de fonte no topo da câmara, e o sólido borbulhante vai, por gravidade, para o tubo de reciclo em direção ao *riser*.

Segundo Basu e Cheng (2000), a taxa de fluxo de sólidos através da *loop-seal* pode ser encontrada pela Eq. (1):

$$W_s = c(1 - \varepsilon_r)\rho_s(2g)^{0.5}\Delta h_r^{1.5}W \text{ [kg/s]} \quad (1)$$

Para partículas entre 150 e 250 μm , C varia 0,065 e 0,08; e ε_r varia de 0,5 para leitos fixos, a 0,84 para LFC a altas velocidades (Basu, 2006).

Grace (1997) coloca que o fluxo de sólidos típico em sistemas de combustão de carvão mineral, em regime circulante, fica entre 10 $\text{kg/m}^2\text{s}$ e 40 $\text{kg/m}^2\text{s}$. Para este projeto, esse fluxo relaciona-se com a Eq. (1), sendo esta multiplicada pela área onde a vazão é medida.

A partir da Eq. (1) é encontrado o fluxo mássico teórico, que pode ser comparado ao fluxo mássico experimental obtido nos testes, levando a valores para a constante experimental que relaciona os dois fluxos.

2 METODOLOGIA

Para obter os dados de operação da válvula *loop-seal* foi utilizada a bancada de testes de leito fluidizado, conforme a Figura 2.

A válvula utilizada possui as câmaras de suprimentos e de reciclo com as mesmas dimensões úteis em sua base:

Largura: 0,085 m; Comprimento: 0,0825 m; Altura H: 0,240 m; A altura da fenda *hs*: 0,017 m.

Estes dados foram utilizados para encontrar algumas variáveis no projeto, como a vazão mássica e a velocidade de aeração através da *loop-seal*. As partículas utilizadas possuem as propriedades descritas na Tabela 1. As propriedades referentes as esferas de vidro foram encontradas em Bianchi (2014). Essas partículas apresentaram características semelhantes às cinzas produzidas pela queima do carvão em caldeiras de Leito Fluidizado, e esse foi um dos fatores que levaram a sua escolha. Outro fator importante é a classificação segundo Geldart (1973), em que as esferas de vidro se encontram no limiar entre os grupos B e D, e a areia de fundição está no grupo B. Estudos realizados com diversos tipos de partículas mostram que partículas do grupo B tem melhor comportamento quando utilizadas em sistemas LFC com *loop-seal* (Kim, 2000).

Figura 2 – Bancada de testes (Bianchi, 2014).

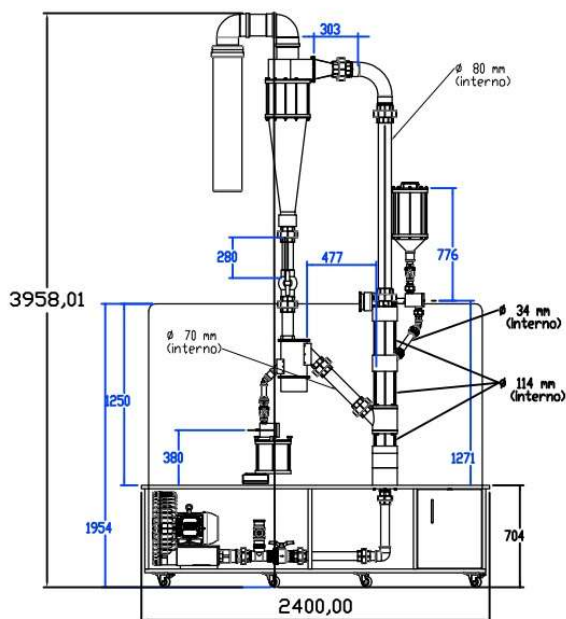


Tabela 1: Características das partículas utilizadas

Amostra	Diâmetro de Sauter, Mm	Massa Esp. Bulk, kg/m³	Massa Esp. Aparente, kg/m³	Massa Esp. Real, kg/m³	ϕ
Esferas de vidro (1)	0,800	1580	2490	2490	0,872
Areia de Fundição (2)	0,293	1560	2640	---	0,880

A Tabela 2 mostra também a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) e a quantidade de partículas utilizadas nos testes.

Tabela 2 – Classificação de Geldart, U_{mf} e inventários das partículas utilizadas.

Amostra	Classificação de Geldart	U_{mf} , kg/m³	Inventário 1, kg	Inventário 2, kg
Esferas de vidro (1)	D	0,547	10,6	8,9
Areia de Fundição (2)	B	0,100	8,5	10,6

A U_{mf} das esferas de vidro foi obtida experimentalmente em Bianchi (2014). A U_{mf} para a areia de fundição foi obtida teoricamente, através das Eq. (3) e (4), conforme indicado por Yang (2003):

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

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad [---] \quad (4)$$

Para a areia de fundição, as contantes que mais se adequaram foram as de Chitester et al (1984), com valores de:

$$C_1 = 28,7$$

$$C_2 = 0,0494$$

Com o número de Reynolds para a mínima fluidização, chegamos a U_{mf} pela Eq. (5):

$$U_{mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{Re_{mf} \mu} \quad [---] \quad (5)$$

Através desse desenvolvimento, chegou-se aos dados para a U_{mf} encontrados na Tabela 2. As velocidades de aeração na válvula serão múltiplos de U_{mf} . Os rotâmetros instalados na bancada, e o

próprio sistema determinou os limites de pressão (mínima de 2 bar e máxima de 3 bar).

A perda de carga proporcionada pela junção da válvula e a mangueira que insufla o ar, faz com que as pressões injetadas na válvula caiam para pressões próximas a 1bar, sendo que em condições de pressão inferiores a 2 bar, poucos pontos de medida foram possíveis de serem obtidos. Portanto este ponto de pressão, 2 bar, foi escolhido como ponto inicial, permitindo que os rotâmetros trabalhem de 0 a 120 l/min. Para evitar que o sistema sofra alguma avaria, foi recomendado trabalhar no máximo a 3 bar, pois pressões acima desta podem causar vazamentos, ou mesmo danificar alguns componentes da bancada de testes.

Para a medida da vazão mássica, foi adotado o seguinte procedimento:

- 1- Inserção das variáveis de injeção de gás no *riser* e câmaras da *loop-seal*;
- 2- Estabilização do sistema;
- 3- Leitura dos dados referentes aos manômetros em U, altura de transbordo Δh_r , e altura da coluna de sólidos no *standpipe*;
- 4- Fechamento da válvula no *downcorner*, e tomada de tempo em que as partículas preenchem um volume determinado do *standpipe*;
- 5- Reabertura da válvula no *standpipe*.

Esses procedimentos foram executados para todos os testes em que houve estabilização das partículas dentro da faixa visível do *standpipe*, localizada entre o *standpipe* e a parte mais baixa do ciclone.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Bianchi (2014), para as esferas de vidro a velocidade mínima para que o leito entre em estado circulante é de 7 Umf. Para este projeto foi adotada a velocidade inicial de 8 Umf para os experimentos, visto que a 7 Umf o sistema fica pouco acima do equilíbrio, e a quantidade de partículas em circulação é muito pequena, dificultando a obtenção de resultados nos testes.

Já para a areia de fundição, o fluxo mostrou-se com potencial para testes acima de 30 Umf no *riser*, sendo que para velocidades de injeção mais baixas, o fluxo é muito baixo em relação ao fluxo proporcionado pela injeção de gás na *loop-seal*.

Com testes preliminares, foram determinadas as vazões de aeração mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Faixas de vazão de aeração.

Componente, Amostra	Vazão Mínima, l/min	Vazão Máxima, l/min
<i>Loop-seal</i> , esferas de vidro	96	276
<i>Loop-seal</i> , areia de Fundição	84	252
<i>Riser</i> , esferas de vidro	2682	4020
<i>Riser</i> , areia de fundição	2142	2754

Apesar de algumas características dos dois tipos de partículas serem bem próximas, como massa específica de *bulk* e esfericidade, a fluidização da areia de fundição é mais fácil que a das esferas de vidro. Isso é devido principalmente ao diâmetro das partículas de areia de fundição ser menor, constatando que o sistema trabalha melhor com partículas do grupo B de Geldart.

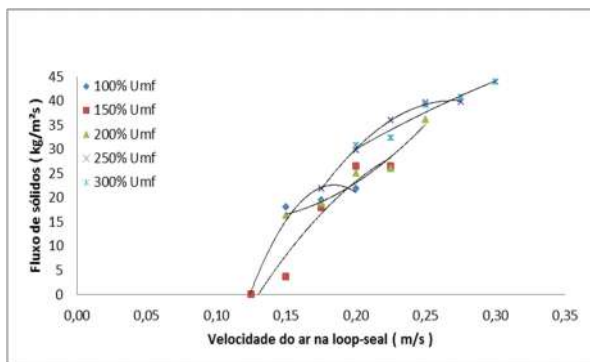
3.1 EFEITO DA VELOCIDADE DO AR DA VÁLVULA LOOP-SEAL NO FLUXO DE SÓLIDOS

A injeção de gás através da *loop-seal* causa um aumento no fluxo mássico no sistema. Na Figura 2 cada curva representa uma velocidade de injeção fixa para a câmara de suprimentos, com a variação da velocidade de injeção na câmara de reciclo. A velocidade absoluta, no eixo "X", é determinada pela soma das vazões de injeção nas duas câmaras pela área da câmara de reciclo.

A forma ascendente do gráfico está de acordo com a encontrada em outros trabalhos, e os valores absolutos diferem devido aos parâmetros adotados nos testes.

Para velocidades abaixo de 0,15 m/s, o fluxo na *loop-seal* é baixo em relação ao fluxo proporcionado pelo *riser*, o que levou à inundação do *standpipe*, impedindo a tomada de tempo para o cálculo da vazão. Os pontos onde as condições dos experimentos melhoraram, mostraram um fluxo acima de 10 kg/m²s, condizente com a faixa de fluxo típica indicada por Grace (1997).

Figura 2 – Fluxo de sólidos no *standpipe* em função da velocidade do ar na *loop-seal*, partícula 2, 35 Umf a 3 Bar, inventário 1.



3.2 EFEITO DAS VELOCIDADES DO AR NAS DUAS CÂMARAS DA VÁLVULA LOOP-SEAL

Alguns pontos nos experimentos levaram a mesma velocidade absoluta de aeração na *loop-seal*. Como esses pontos são divididos em pontos onde a velocidade de aeração é maior na câmara de suprimentos ou na câmara de reciclo, foi verificado uma pequena diferença no fluxo para esses pontos, como pode ser visto na Tabela 4. A injeção de gás na câmara de suprimentos causa um efeito maior sobre

o fluxo mássico, do que a injeção de gás na câmara de reciclo.

Esses dados mostram que o fluxo é levemente maior, para uma mesma velocidade absoluta, quando a velocidade na câmara de suprimentos é maior. Então para uma mesma velocidade absoluta de injeção, pode haver fluxo através da válvula se a injeção for maior na câmara de suprimentos, mas o fluxo pode parar se o contrário for feito. Isto foi averiguado em pontos que estavam no limite da fluidização na *loop-seal*. Para uma velocidade de teste de 0,05m/s na câmara de suprimentos e 0,20m/s na câmara de reciclo, o fluxo é de 19,48kg/m²s, menor que o fluxo obtido quando invertemos as velocidades. Isto foi averiguado em mais de 90% dos testes realizados.

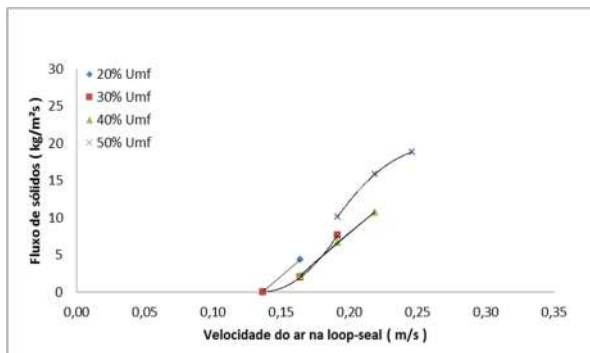
3.3 EFEITO DA PRESSÃO DE AR DA VÁLVULA LOOP-SEAL NO FLUXO DE SÓLIDOS

Foram realizados testes com pressões diferentes de injeção de gás na *loop-seal*. Os resultados indicam que o fluxo diminuiu com o aumento da pressão de injeção. Isso pode ser visto nas Figuras 3 e 4.

Tabela 4 – Fluxos de massa em função das velocidades de injeção de ar.

Velocidade (m/s)		Fluxo (kg/m²s)	Velocidade (m/s)		Fluxo (kg/m²s)
Câmara de Suprimentos	Câmara de Reciclagem		Câmara de Suprimentos	Câmara de Reciclagem	
0,05	0,15	18,01	0,15	0,05	16,38
0,05	0,20	19,48	0,20	0,05	21,91
0,05	0,25	21,93	0,25	0,05	30,71
0,10	0,25	26,56	0,25	0,10	32,32
0,15	0,25	36,11	0,25	0,15	39,13
0,20	0,25	39,80	0,25	0,20	40,81

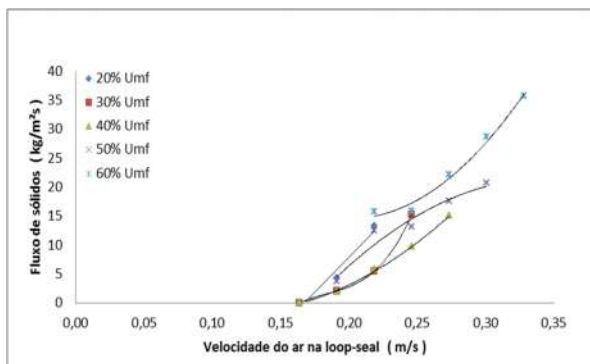
Figura 3 – Fluxo de sólidos em função da velocidade de ar na *loop-seal* empregando 2bar de pressão no bico de injeção de ar; partícula 1, 8 Umf no *riser*; inventário 1.



Para velocidades de injeção abaixo de 0,2 m/s o sistema ficou com um controle limitado, levando mais tempo para a estabilização, o que mostra que o fluxo acima de 10 kg/m²s é realmente mais recomendado para a uma melhor operação.

Apesar de não terem sido obtidos todos os pontos na Figura 3, devido a limitações na pressão, para os dados obtidos, o resultado mostra que o aumento da pressão de injeção indica uma diminuição no fluxo.

Figura 4 – Fluxo de sólidos em função da velocidade de ar na *loop-seal* empregando 3 bar de pressão no bico de injeção de ar; partícula 1, 8 Umf no *riser*; inventário 1.



Devido a mudança de diâmetro entre a mangueira de injeção e a conexão fixada na *loop-seal*, há uma grande perda de carga, o que leva a pressão de injeção se reduzir a uma pressão próxima da atmosférica. Contudo, a uma pressão de 2 bar, mesmo com essa perda de carga, ainda se obtém um fluxo levemente maior do que quando operado a uma pressão de 3 bar, como mostram as Figuras 3 e 4.

3.4 EFEITO DA MASSA DE INVENTÁRIO NO FLUXO DE SÓLIDOS

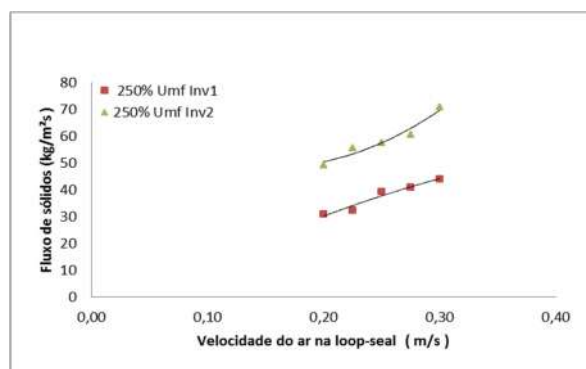
A quantidade de partículas também tem influência no fluxo. Para a variação do inventário, os dados mostraram que com um inventário maior, o fluxo será maior para uma mesma velocidade de aeração. Isto pode ser visto na Figura 5.

Para os inventários menores, inventário 2 para partícula 1 e inventário 1 para a partícula 2, nas velocidades de injeção mais extremas, foi notado uma fluidização grande na câmara de suprimentos, chamada de *slug*, que faz com que o fluxo siga o caminho contrário, indo em direção ao *standpipe*. Nessas velocidades, em torno de 10% das velocidades superiores adotadas nos testes, o fluxo de gás cria bolsas de gás, que sobem através do *standpipe*, gerando grande variação no fluxo mássico e causando problemas no controle da vazão na *loop-seal* e no *riser*. Por isso, essas velocidades não foram ultrapassadas. Para os inventários maiores, devido ao número maior de partículas, esse problema foi notado somente a velocidades mais elevadas.

Outro problema encontrado foi devido ao excesso de partículas no *standpipe* para os inventários maiores. Quando a velocidade de injeção

no *riser* é elevada, e a injeção de gás na *loop-seal* é baixa, ocorre uma inundação do *standpipe*, e as partículas passam do campo de visão proporcionado pelos tubos de acrílico, chegando até o ciclone. Isso impossibilitou a medição da vazão para os pontos iniciais e extremos na maioria dos testes.

Figura 5 – Variação do fluxo mássico em relação a mudança de inventário, partícula 2, 35 Umf a 3 bar, inventários 1 e 2.



Durante os experimentos com partículas de areia de fundição, foi visto que com o inventário 1 o sistema comportou-se de forma melhor, mais constante quando comparado com o comportamento do sistema operado com o inventário 2. Pela Figura 5 percebe-se que a curva do inventário 1 está localizada dentro da faixa típica citada por Grace (1997). Já a curva para o inventário 2 está acima dessa faixa, e o trabalho com esse inventário deixou o sistema mais instável, sendo muito difícil a estabilização de vários pontos testados.

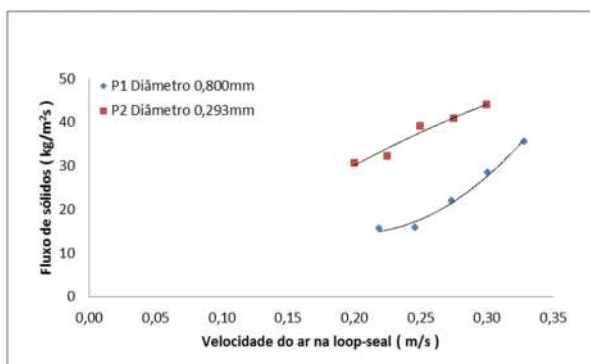
3.5 EFEITO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS NO FLUXO DE SÓLIDOS

Outro resultado obtido é a variação do fluxo com a modificação do tamanho das partículas. A Figura 6 mostra essa variação. A velocidade de injeção de gás no *riser* é menor para a partícula 2, e mesmo nesta condição o fluxo mássico apresentado pela partícula 2 é maior que o apresentado pela partícula 1, para as mesmas velocidades de aeração na *loop-seal*.

Esse comportamento já era esperado a partir dos dados obtidos para as velocidades de fluidização. Como a partícula 2 possui um diâmetro menor, mais

partículas são arrastadas para uma mesma velocidade de aeração, gerando um maior fluxo de recirculação.

Figura 6 – Variação do fluxo mássico com a mudança de partícula; partícula 1 a 8 Umf, 3bar, inventário 1; partícula 2 a 35 Umf, 3bar, inventário 1.



Esse comportamento já era esperado a partir dos dados obtidos para as velocidades de fluidização. Como a partícula 2 possui um diâmetro menor, mais partículas são arrastadas para uma mesma velocidade de aeração, gerando um maior fluxo de recirculação.

3.6 EFEITO DA VELOCIDADE DE AR (RISER) NO FLUXO DE SÓLIDOS

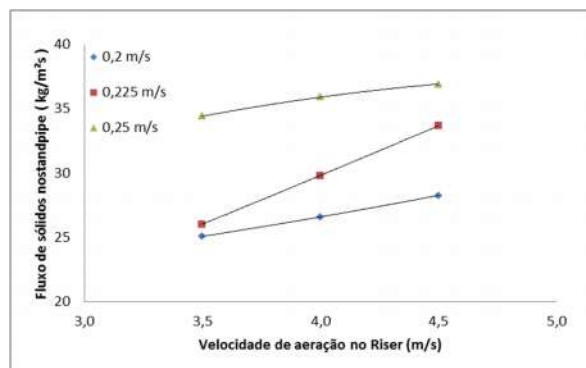
O aumento da aeração no riser provoca um aumento do fluxo de partículas no sistema, como mostra a Figura 7. Esse aumento leva a um arraste maior das partículas para a loop-seal, sendo necessária também uma elevação na injeção de gás na válvula. Para velocidades superiores a 4,5 m/s de injeção de ar no riser, o comportamento do sistema fica instável, e torna-se difícil a coleta de dados confiáveis.

3.7 EFEITO DA VELOCIDADE DE AERAÇÃO NA LOOP-SEAL SOBRE A ALTURA DE PARTÍCULAS NO STANDPIPE

A altura da massa de sólidos que se acumula no standpipe tem relação com a fluxo de gás injetado na loop-seal. Como pode ser visto na Figura 8, a altura é máxima para fluxos mais baixos, e quanto mais gás injetado na loop-seal, maior será a fluidização das partículas, e com isso os sólidos

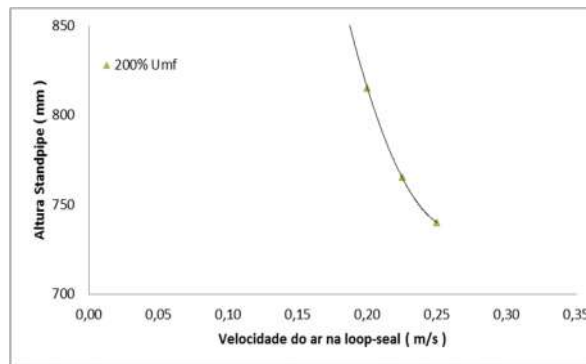
fluirão mais facilmente pela válvula, diminuindo a coluna de sólidos no standpipe.

Figura 7 – Variação do fluxo mássico em relação a velocidade de injeção de gás no riser; partícula 2, 3 bar, inventário 1, 35 umf, 40 Umf e 45 Umf.



O tamanho da área visível do standpipe, utilizada para as medições, é pequena em relação ao comprimento total desde a câmara de suprimentos até o ciclone, o que dificultou a obtenção de um maior número de dados sobre a variação da altura da coluna de sólidos.

Figura 8 – Variação da altura da coluna de sólidos no standpipe em relação a velocidade de injeção de gás na loop-seal; partícula 2, 40 Umf a 3 bar, inventário 1.



Dividindo o fluxo de sólidos medido pelo fluxo de sólidos teórico, chegou-se a constante C da Eq. 1, como pode ser visto na Tabela 5.

Para aumentar a precisão e ter uma visualização melhor do comportamento do sistema, foi obtida uma constante para cada faixa de velocidade de injeção de gás no riser. Os resultados mostram que para velocidades maiores, a constante

aumenta, e isto também ocorre quando a quantidade e diâmetro de partículas também aumenta.

Tabela 5 – Constante C de ajuste experimental

Testes	C médio (---)	Testes	C médio (---)
8 Umf 2 Bar Inv 1 P1	0,301	8 Umf 3 Bar Inv 1 P1	0,376
10 Umf 2 Bar Inv 1 P1	0,698	10 Umf 3 Bar Inv 1 P1	0,668
12 Umf 2 Bar Inv 1 P1	---	12 Umf 3 Bar Inv 1 P1	---
10 Umf 3 Bar Inv 2 P1	0,457	12 Umf 3 Bar Inv 2 P1	0,558
35 Umf 3 Bar Inv 1 P2	0,354	35 Umf 3 Bar Inv 2 P2	0,393
40 Umf 3 Bar Inv 1 P2	0,340	45 Umf 3 Bar Inv 1 P2	0,421

Esses valores estão acima dos encontrados na literatura (Basu, 2006), para partículas entre 150 e 250 μm . Os valores maiores podem estar associados ao fato de estar fora da faixa de tamanho de partículas de referência indicado pela literatura. É importante salientar que estes ajustes podem estar atrelados as particularidades da bancada e espera-se que cada protótipo possua a sua própria constante de ajuste quando se trabalha nas mesmas condições de teste.

4 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível verificar as seguintes conclusões:

- A injeção de gás através da *loop-seal* causou um aumento no fluxo mássico no sistema. Para velocidades baixas, o fluxo proporcionado pela válvula é baixo em relação a quantidade de partículas vindas do *riser*, o que levou a inundação do *standpipe*, impendendo as condições de operação normal do sistema, e a consequente medida de vazão mássica. Para velocidades de aeração muito elevadas na válvula e no *riser*, ocorre muita turbulência nas duas câmaras da válvula, a coluna de sólidos no *standpipe* chega a zero, e a instabilidade do sistema chega aos pontos mais elevados, levando a consideração de que esses extremos, tanto máximo quanto mínimo de aeração, devem ser evitados.
- Já para o sistema operando no modo fluidizado circulante, dentro das faixas de testes utilizadas neste trabalho, a válvula não mecânica do tipo *loop-seal*, o sistema trabalhou de forma mais estável com a partícula do grupo B, em relação ao trabalho com a partícula do grupo D.

- A câmara de suprimentos tem papel importante no sistema, visto que sua influência sobre o fluxo mássico é maior que a influência gerada pela câmara de reciclo. Apesar de ser utilizada a velocidade absoluta de aeração para a *loop-seal* na obtenção do fluxo de sólidos, deve ser considerado o efeito da mudança de aeração de forma individual para as duas câmaras, pois este pode modificar o efeito gerado no sistema, principalmente em pontos onde se inicia o fluxo mássico na *loop-seal*.

- A pressão de injeção de gás na *loop-seal* tem influência direta sobre o sistema. O aumento da pressão indica uma diminuição no fluxo mássico, e torna o sistema um pouco mais instável. Para este projeto, a influência da perda de carga nas conexões de injeção de gás na válvula foi grande, visto que levou a pressão de injeção próxima a pressão atmosférica.

- Com a troca de inventários, foi visto que o fluxo cresce com o aumento do inventário. Porém a quantidade de partículas deve ser escolhida com cautela, pois também foi possível observar que o sistema fica mais instável com uma quantidade grande de partículas, e que uma quantidade ideal para trabalho, será aquela que mantiver o fluxo mássico dentro da faixa de 10 $\text{kg/m}^2\text{s}$ e 40 $\text{kg/m}^2\text{s}$. Esta quantidade também faz com que os efeitos de inundação do *standpipe* e *slug* sejam minimizados.

- Para os efeitos do tamanho de partícula, foi observada a necessidade de uma quantidade menor de gás injetado para a obtenção de um mesmo fluxo. Para velocidades de injeção de mesma ordem, a partícula de menor diâmetro apresentou um fluxo maior que a partícula de maior diâmetro.

- A variação na velocidade de aeração no *riser* leva a uma variação no fluxo mássico do sistema, tornando necessário o aumento na aeração da *loop-seal* para manter o fluxo de partículas constante, e caso a aeração na válvula não fosse aumentada, provocaria a inundação do *standpipe*, e consequentemente um colapso no sistema. Quando a aeração na válvula foi aumentada além da necessária para manter o fluxo, a coluna de sólidos diminuía, chegando em alguns pontos ao início da câmara de sumprimentos.

- Os resultados encontrados para a constante experimental, que iguala o fluxo teórico ao experimental, mostraram que ela varia proporcionalmente com a velocidade de aeração no *riser*, com a quantidade de partículas no sistema, e com o tamanho de partículas utilizadas.

- A faixa de trabalho típica de fluxo mássico encontrada na literatura é condizente com os testes realizados, sendo que o sistema apresentou um controle mais estável quando o fluxo estava dentro desta faixa, sendo a recomendada para trabalhos futuros.

5 NOMENCLATURA

W_s : vazão mássica de sólidos através da *loop-seal* [kg/s];

ρ_s : massa específica aparente dos sólidos [kg/m³];

Δh_r : altura dos sólidos transbordando para retornar ao *riser* [m];

W : largura da *loop-seal* ou diâmetro do tubo de retorno que deixa a válvula [m];

ε_r : fração de vazios no leito;

c : constante de ajuste experimental;

Ar : número de Arquimedes [---];

d_p : diâmetro da partícula [m];

μ : viscosidade [Pa.s];

Re_{mf} : Número de Reynolds de mínima fluidização [---];

C_1 e C_2 : constantes empíricas [---];

ρ_g : massa específica do gás [kg/m³].

6 REFERÊNCIAS

BIANCHI, F. M.; DE AQUINO, T. F. **Bancada de leito fluidizado circulante a frio: experimentos e análises de dados**, Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, SATC, 2014.

GRACE, J. R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M. **Circulating fluidized beds**, Blackie Academic & Professional Londres, New York, 1997.

KIM ; S. W.; KIM, S. D.; LEE, D. H. **Pressure Balance Model for Circulating Fluidized Beds with a Loop-seal**. Ind. Eng. Chem. Res. Daejeon 305-701, Korea, 2002.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**, CRC Press. Taylor & Francis, Boca Raton, 2006.

HAN, X. ET AL. **Regulating characteristics of loop seal in a 65 t/h oil shale-fired circulating fluidized bed boiler**. Powder Technology 178. Shanghai, 200240, PR China, 2007.

BASU ; P.; BUTLER, J. **Studies on the operation of loop-seal in circulating fluidized bed boilers**, Applied Energy 86. Nova Scotia, Canada, 2009.

BASU, P.; CHENG, L. **An Analysis of Loop Seal Operations in a Circulating Fluidized Bed**. Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Vol. 78, Part A, October, Nova Scotia, Canada, 2000.

BIANCHI, F. M.; DE AQUINO, T. F.; KESTERING, D.; 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**, 4º CBCM. Gramado, 2013.

GELDART, D. **Types of gas fluidization**. Powder Technology 7, Elsevier Sequoia SA, Lausanne, p. 285-292, 1973.

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

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

CHITESTER DC, KORNOSKY RM, FAN LS, DANKO JP. **Characteristics of fluidization at high pressure**. Chem Eng Sci 39;253–261, 1984.