

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

LUKAS BOBATO DALDIM DOS SANTOS

**ESTUDO DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE COM FLUXO DE AR
PULSANTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

LUKAS BOBATO DALDIM DOS SANTOS

**ESTUDO DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE COM FLUXO DE AR
PULSANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Química do Departamento Acadêmico de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr^a. Maria Regina Parise
Coorientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramírez Behainne

PONTA GROSSA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

Estudo de Leito Fluidizado Circulante com Fluxo de Ar Pulsante

por
Lukas Bobato Daldim dos Santos

Monografia apresentada no dia 13 de junho de 2019 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Everton Moraes Matos
(UTFPR)

Prof. Dr. Cesar Augusto Canciam
(UTFPR)

Profa. Dra. Maria Regina Parise
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

Dedico este trabalho à minha família que
sempre acreditou e confiou no meu
potencial, me fez ter fé nos momentos
mais escuros e seguir sempre em busca
da luz.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a meus pais, Roberto Daldim dos Santos e Cleoni Maria Bobato Daldim dos Santos por todo apoio, suporte financeiro e espiritual para execução deste trabalho.

Agradeço à minha orientadora Prof. Dr^a. Maria Regina Parise por ter acreditado em minha capacidade, proporcionando o aprendizado e transmitindo tanta sabedoria.

Da mesma forma agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Jhon Jairo Ramírez Behainne por todo auxílio na execução e preparação do equipamento para execução dos ensaios.

Ao Pedro Elias Muniz Peres por seu auxílio na preparação das amostras e execução dos ensaios.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

SANTOS, Lukas Bobato Daldim. **Estudo de leito fluidizado circulante com fluxo de ar pulsante**. 2019. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Leito fluidizado circulante (LFC) tem sido utilizado em vários processos industriais, tais como, em combustão, gaseificação e pirólise. O LFC é composto principalmente pelo *riser*, ciclone, *standpipe* e válvula de recirculação de sólidos, como por exemplo a *loop-seal*. Esta válvula é dividida em duas câmaras, a de alimentação e a de reciclagem, que necessitam de aeração para a fluidização das partículas nessa região. Entretanto, o contato gás-sólido na válvula *loop-seal* às vezes não é efetivo. Por outro lado, ar pulsado tem sido amplamente utilizado para melhorar a qualidade da fluidização. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi estudar o comportamento fluidodinâmico com a injeção de ar pulsado na câmara de alimentação e reciclagem e assim realizar a comparação dos resultados obtidos nos dois sistemas. Para esta finalidade, realizaram-se seis ensaios experimentais (sendo três na câmara de alimentação e três na câmara de reciclagem) utilizando fluxo contínuo, e frequência de pulsação de 1 Hz e 2 Hz para cada câmara estudada. O fluxo de ar pulsado foi controlado por uma válvula solenóide. O material utilizado para os ensaios foi areia de fundição, com diâmetro médio de Sauter de 183 μm e densidade aparente de 2712 kg m^{-3} . Em todos os experimentos, o inventário de sólidos foi de 4 kg e a velocidade superficial do ar foi mantida em 4 m s^{-1} . Os resultados obtidos mostraram que a adição de ar pulsado melhorou a fluidodinâmica na válvula *loop-seal*, necessitando menor quantidade de ar para a fluidização. Para as duas câmaras analisadas tornou-se possível trabalhar com taxas de aeração baixas, comprovando-se assim a eficiência da aplicação de ar pulsado na válvula *loop-seal*.

Palavras-chave: Leito fluidizado circulante. Válvula *loop-seal*. Ar Pulsado.

ABSTRACT

SANTOS, Lukas Bobato Daldim. **Study of circulating fluidized bed with pulsating air flow**. 2019. 56 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Chemical Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Circulating fluidized bed (LFC) has been employed in several industrial processes, such as in combustion, gasification and pyrolysis. The LFC is mainly composed of riser, cyclone, standpipe and solid recirculation valve, such as loop-seal. This valve is divided into two chambers, the supply and recycle chambers, which require aeration for the fluidization of the particles in this region. However, the gas-solid contact in the loop-seal valve is sometimes not as effective. On the other hand, pulsed air has been widely used to improve fluidization quality. In this sense, the objective of the present work was to study the fluid dynamics behavior with the injection of pulsed air in the supply and recycling chamber and to compare the results obtained in the two systems. For this purpose, six experimental tests (three in the supply chamber and three in the recycling chamber) were performed using continuous flow, and pulse rate of 1 Hz and 2 Hz for each chamber studied. The pulsed air flow was controlled by a solenoid valve. The material used for the tests was casting sand, with an average diameter Sauter of $183 \mu\text{m}$ and an apparent density of 2712 kg m^{-3} . In all experiments, the solids inventory was 4 kg and the surface air velocity was maintained at 4 m s^{-1} . The results showed that the addition of pulsed air improved the hydrodynamics in the loop-seal valve, requiring less amount of air for the fluidization. For the two analyzed chambers it became possible to work with low aeration rates, thus proving the efficiency of the application of pulsed air to the loop-seal valve.

Keywords: Circulating fluidized bed. *Loop-seal* valve. Pulsed air.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Regimes de fluidização	18
Figura 2 - Leito fluidizado circulante	22
Figura 3 – Estrutura do leito fluidizado circulante	25
Figura 4 - Perfil de pressão	27
Figura 5 – Estrutura leito fluidizado circulante e suas regiões.....	31
Figura 6 – Válvula <i>loop-seal</i> , câmara de alimentação e reciclagem.....	32
Figura 7 - Pontos de tomada de pressão	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva típica de queda de pressão no leito.....	19
Gráfico 2 - Classificação de Geldart para qualquer material sólido.....	21
Gráfico 3 - Fluidização rápida.....	24
Gráfico 4 – Perfil axial de porosidade para um leito	26
Gráfico 5 - Perfil da queda de pressão no <i>riser</i> – pulsação 1 Hz	43
Gráfico 6 - Perfil da queda de pressão no <i>standpipe</i> – pulsação 1 Hz.....	44
Gráfico 7 - Perfil da queda de pressão na válvula <i>loop-seal</i> – pulsação 1 Hz.....	44
Gráfico 8 - Perfil da queda de pressão no <i>riser</i> – pulsação 2 Hz	45
Gráfico 9 - Perfil da queda de pressão no <i>standpipe</i> – pulsação 2 Hz.....	46
Gráfico 10 - Perfil da queda de pressão na válvula <i>loop-seal</i> – pulsação 2 Hz.....	46
Gráfico 11 - Perfil da queda de pressão no <i>riser</i> – sistema contínuo	47
Gráfico 12 - Perfil da queda de pressão no <i>standpipe</i> – sistema contínuo	48
Gráfico 13 - Perfil da queda de pressão na válvula <i>loop-seal</i> – sistema contínuo	48
Gráfico 14 – Taxa de recirculação de sólidos – câmara de alimentação	49
Gráfico 15 - Perfil da queda de pressão no <i>riser</i> – câmara de alimentação.....	50
Gráfico 16 - Perfil da queda de pressão no <i>standpipe</i> – câmara de alimentação	51
Gráfico 17 - Perfil da queda de pressão <i>loop-seal</i> – câmara de alimentação	51
Gráfico 18 – Taxa de recirculação de sólidos – câmara de reciclagem	52
Gráfico 19 - Perfil da queda de pressão <i>riser</i> – câmara de reciclagem.....	53
Gráfico 20 - Perfil da queda de pressão <i>standpipe</i> – câmara de reciclagem	53
Gráfico 21 - Perfil da queda de pressão <i>loop-seal</i> – câmara de reciclagem	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da areia de fundição.....	38
Tabela 2 – Bloco 1 experimentos.....	39
Tabela 3 – Bloco 2 experimentos.....	39
Tabela 4 – Vazões de aeração.....	40

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Unidade de fluidização rápida a frio e seus componentes.	37
Fotografia 2 – Válvula loop-seal	38
Fotografia 3 – Areia fundição 183 μm	39

LISTA DE SÍMBOLOS

Ar	número de Arquimedes	[]
$A_{loop-seal}$	área da seção transversal da <i>loop-seal</i>	[m ²]
$(A_{t-riser})$	área de seção transversal do riser	[m ²]
D	diâmetro	[m]
G_s	taxa de circulação de sólidos	[kg m ⁻² s ⁻¹]
G_u	fluxo de sólidos ascendente	[kg m ⁻² s ⁻¹]
G_d	fluxo de sólidos descendentes	[kg m ⁻² s ⁻¹]
h	altura a partir da <i>base loop-seal</i> equipamento	[m]
h_i	altura do ponto de inflexão	[m]
H	altura até o ponto de distribuição	[m]
H_t	altura do leito até saída válvulas <i>loop-seal</i>	[m]
m_{areia}	massa da areia	[kg]
N_f	número de fluidização	[]
P_s	pressão do ar no <i>plenum</i> da válvula <i>loop-seal</i>	[N m ⁻²]
P_0	pressão do ar no <i>plenum</i> do leito principal	[N m ⁻²]
t_{am}	tempo de amostragem	[s]
$U_{loop-seal}$	velocidade na válvula <i>loop-seal</i>	[m/s]
U_o	velocidade superficial do gás	[m s ⁻¹]
U_{ch}	velocidade de <i>choking</i>	[m s ⁻¹]
U_t	velocidade terminal das partículas	[m s ⁻¹]
U_t	velocidade terminal das partículas	[m s ⁻¹]
U_{tr}	velocidade de transporte	[m s ⁻¹]
U_s	velocidade linear ascendente dos sólidos	[m s ⁻¹]
U_d	velocidade linear descendente dos sólidos	[m s ⁻¹]
U_{mf}	velocidade do ar na mínima fluidização	[m s ⁻¹]
V_A	vazão de aeração experimental	[m ³ s ⁻¹]
W	massa de sólidos	[kg]

LETRAS GREGAS

ΔP	queda de pressão do leito	[Pa]
$\Delta P_{\text{máx}}$	queda de pressão máxima	[Pa]
ϵ_m	porosidade inicial do leito	[]
ϵ_f	porosidade final do leito	[]
ϵ_c	porosidade de <i>choking</i>	[]
ρ_p	densidade da partícula	[kg m ⁻³]
ρ_g	densidade do gás	[kg m ⁻³]
μ	viscosidade dinâmica do gás	[N.s m ⁻²]
ρ_g	densidade do gás	[kg m ⁻³]
ϵ_a	porosidade do sistema	[]
ϵ_d	porosidade na fase diluída	[]
ϵ_s	porosidade do leito abaixo do ponto inflexão	[]
ϵ_e	porosidade de cálculo	[]
ΔP_{F-A}	queda de pressão no ponto F-A	[N m ⁻²]
ΔP_{A-B}	queda de pressão no ponto A-B	[N m ⁻²]
ΔP_{B-C}	queda de pressão no ponto B-C	[N m ⁻²]
ΔP_{C-D}	queda de pressão no ponto C-D	[N m ⁻²]
ΔP_{D-E}	queda de pressão no ponto D-E	[N m ⁻²]
ΔP_{E-F}	queda de pressão no ponto E-F	[N m ⁻²]
$\Delta P_{dist,S}$	queda de pressão na distribuição da válvula <i>loop-seal</i>	[N m ⁻²]
$\Delta P_{dist,b}$	queda de pressão na distribuição do leito principal	[N m ⁻²]
ΔP_b	queda de pressão do <i>riser</i> nível reciclagem	[N m ⁻²]
ΔP_{sb}	queda de pressão válvula <i>loop-seal</i>	[N m ⁻²]
ΔP_{riser}	queda de pressão no <i>riser</i>	[Pa]
$\Delta P_{standpipe}$	queda de pressão no <i>standpipe</i>	[Pa]
$\Delta P_{loop-seal}$	queda de pressão válvula <i>loop-seal</i>	[Pa]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 FLUIDIZAÇÃO	17
3.1.1 Regimes de Fluidização	17
3.1.1.1 Vantagens e desvantagens da fluidização em operações industriais.	18
3.2 VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO	19
3.2.1 Classificação de Geldart para Partículas Sólidas	20
3.3 LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE	21
3.4 TRANSIÇÃO REGIME TURBULENTO PARA O RÁPIDO	22
3.4.1 Velocidade de Transporte	24
3.5 FLUIDODINÂMICA E ESTRUTURA LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE	25
3.5.1 Perfil Axial de Porosidade	25
3.5.2 Efeitos da Taxa de Circulação no Perfil da Porosidade	26
3.5.2.1 Efeito do inventário de partículas	30
3.5.2.1.1 <i>Distribuição da porosidade no leito fluidizado rápido</i>	30
3.6 VÁLVULA LOOP-SEAL	32
3.6.1 Balanço de Pressão na Válvula <i>loop-seal</i>	33
3.6.2 Fluxo de Ar através da Válvula <i>loop-seal</i>	33
3.7 LEITO FLUIDIZADO PULSANTE	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL	36
4.2 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	38
4.3 ORGANIZAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
4.3.1 Organização experimental	39
4.3.2 Procedimento experimental	40
4.4 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 SISTEMA COM FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO DE 1HZ	43
5.2 SISTEMA COM FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO DE 2HZ	45
5.3 SISTEMA CONTÍNUO	47
5.4 ANÁLISE DA CÂMARA DE ALIMENTAÇÃO	49
5.5 ANÁLISE DA CÂMARA DE RECICLAGEM	52
6 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Leito fluidizado circulante é empregado em grande escala nas indústrias em processos que necessitam de altas vazões de gás. As principais vantagens são a possibilidade de se manter uma temperatura uniforme sobre todo sistema, tempo de residência das partículas ser longo e controlado, flexibilidade na operação com diferentes diâmetros de partículas e mistura efetiva e contato eficiente entre gás e partículas.

Para Basu (2006), o leito fluidizado circulante é composto pelo *riser*, onde as partículas ascendem, o *downer*, no qual as partículas são transportadas no sentido da aceleração gravitacional e pela válvula de recirculação de sólidos, como a *loop-seal*, sendo esta composta por duas câmaras, uma de alimentação e outra de reciclagem.

Koksal e Zhang (2005) utilizaram leito fluidizado borbulhante com esferas de vidro e areia para investigar os efeitos da pulsação na transferência de calor e na fluidodinâmica do leito. Alguns estudos demonstraram que a aplicação de pulsação diretamente no leito tem demonstrado resultados efetivos.

Ireland, Pitt e Smith (2016) realizaram estudos com leito fluidizado pulsante e a justificativa dos pesquisadores para realização destes estudos é o fato de que pesquisas com leito fluidizado pulsante tem demonstrado melhoras na transferência de massa e de calor e tornado possível a utilização de valores abaixo da velocidade de mínima fluidização.

A válvula *loop-seal* é extremamente utilizada em leitos fluidizados circulantes, desta forma, inserir ar pulsado na mesma mostrou-se uma opção para estudos dos efeitos em suas duas câmaras, sendo na alimentação e reciclagem.

Com estes estudos torna-se possível compreender quais são as variáveis que interferem neste processo e qual será a influência da pulsação no comportamento das partículas e a sua possível influência sobre a pressão e na taxa de recirculação dos sólidos.

Com os dados obtidos através dos experimentos, um diagnóstico sobre todo o sistema pode ser traçado, observando as diferenças entre as câmaras e as influências da pressão no sistema e assim compreender se a pulsação na válvula *loop-seal* é eficiente a ponto de se obter uma melhora efetiva ou uma economia da vazão de aeração para todo o sistema.

É importante ressaltar que não foram encontrados trabalhos na literatura sobre aplicação de ar pulsado na válvula *loop-seal*.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado circulante com a injeção de ar pulsado na válvula de recirculação de sólidos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar testes de fluidização rápida contínua, visando obter as condições de estabilidade em função do inventário de partículas sólidas;
- Executar a montagem e a instalação do sistema pulsante e instrumentação necessária;
- Promover a aeração pulsante na válvula *loop-seal* nas mesmas condições de fluxo contínuo, com variação na frequência de pulsação;
- Comparar a operação de alimentação contínua e pulsante.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta os principais conceitos teóricos de fluidização relacionados com o trabalho desenvolvido. Descreve-se inicialmente os regimes de fluidização, a classificação de partículas sólidas e particularidades do regime de fluidização circulante. Posteriormente, introduzem-se os conceitos de leito fluidizado pulsado e os principais resultados obtidos de pesquisas realizadas sobre o assunto.

3.1 FLUIDIZAÇÃO

Fluidização é uma operação de contato entre o leito, sendo este formado por partículas sólidas e o fluxo de ar ascendente, o qual proporciona uma perfeita mistura entre estas fases, acarretando em altas taxas de transferência de calor e massa (KUNII; LEVENSPIEL,1991).

Li (2002) cita a importância, bem como, a aplicação da fluidização em diversos processos na indústria, podendo ser utilizado em reatores químicos, recobrimento de partículas, granulação, secagem, gaseificação do carvão e da biomassa.

3.1.1 Regimes de Fluidização

Segundo Kunii e Levespiel (1991), quando um fluido passa por um leito com partículas sólidas a baixa velocidade o mesmo passa pelos interstícios dessas partículas. Este comportamento do leito se caracteriza como o regime de leito fixo, conforme pode ser visto na Figura (1 a).

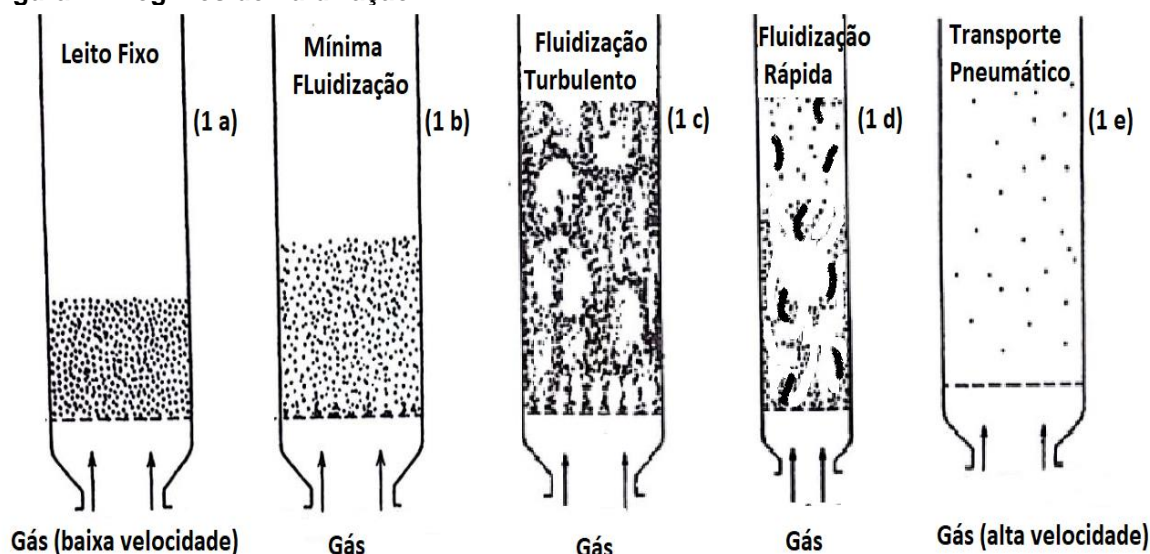
Ao se aumentar a velocidade do fluido ocorre a expansão do leito e as partículas sólidas ficam suspensas pelo fluxo gasoso ascendente. Neste momento, a queda de pressão por área em qualquer seção do leito torna-se igual ao peso das partículas, caracterizado pelo regime de mínima fluidização (KUNII; LEVENSPIEL,1991), conforme pode ser visto na Figura (1 b).

Em maiores vazões de fluido, a agitação começa a se tornar mais violenta e o movimento dos sólidos se torna mais vigoroso, caracteriza-se o leito fluidizado turbulento (KUNII; LEVENSPIEL,1991), conforme pode ser visto na Figura (1 c).

Quando há um aumento na velocidade de contato entre o gás e os sólidos ocorre a elutriação das partículas, caracterizando o regime de fluidização rápida (BASU, 2006), conforme pode ser visto na Figura (1d).

Para uma vazão de gás superior, ocorre o transporte das partículas sólidas. Sendo este o último regime caracterizado e denominado como transporte pneumático, segundo KUNII e LEVENSPIEL (1991), conforme pode ser visto na Figura (1e).

Figura 1 - Regimes de fluidização



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

3.1.1.1 Vantagens e desvantagens da fluidização em operações industriais.

Para Kunii e Levenspiel (1991), dentre as vantagens da fluidização pode-se destacar:

- A mistura rápida dos sólidos, as quais conduzem a condições muito próximas as de um reator isotérmico, sendo que a operação dos processos é simples e fácil;
- a circulação de sólidos entre dois leitos fluidizados torna possível a remoção ou adição de calor produzido em reatores;
- a fluidização é adequada para processos em larga escala industrial;
- conseguir atingir taxas de transferência de calor e de massa entre o gás e as partículas sólidas, sendo estas taxas muito maiores comparadas com outros processos que envolvem contato.

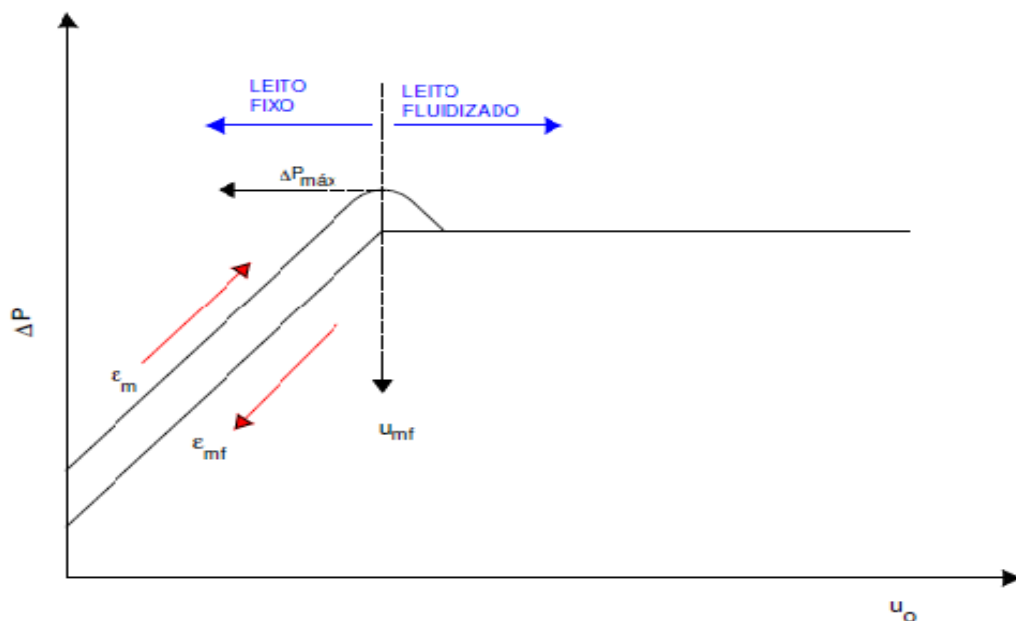
Segundo Kunii e Levenspiel (1991), as desvantagens dos processos de fluidização são:

- os sólidos quebradiços são pulverizados ao entrar em contato com o gás e precisam ser substituídos;
- a erosão na tubulação e nos vasos, devido à abrasão das partículas sólidas com as paredes.

3.2 VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO

O Gráfico 1 ilustra um diagrama típico da queda de pressão do leito (ΔP) em função da velocidade (u_o) do gás, para um leito com partículas sólidas.

Gráfico 1 – Curva típica de queda de pressão no leito



Fonte: Adaptado Kunii e Levenspiel (1991).

Quando o leito atinge o regime de leito fixo, a queda de pressão é proporcional a velocidade do gás. Com o incremento desta velocidade, atinge-se uma queda de pressão máxima ($\Delta P_{máx}$), que segundo Kunii e Levenspiel (1991), para uma velocidade superficial do gás superior à de mínima fluidização, o leito se expandirá, havendo um aumento da porosidade do leito de ϵ_m para ϵ_f , e as bolhas de gás se tornam visíveis, como resultado se obtém a fluidização heterogênea. A partir deste

ponto, a queda de pressão no leito mantém-se praticamente constante, independente do aumento da velocidade superficial do gás. Quando se cessa a vazão do gás, uma acomodação no leito reduzirá a porosidade do mesmo para seu valor inicial (ϵ_m).

3.2.1 Classificação de Geldart para Partículas Sólidas

Segundo Geldart (1973 apud KUNII, LEVENSPIEL, 1991, p.77) as partículas são classificadas em quatro grupos de acordo com a maneira que se comportam durante a fluidização, sendo estas classificadas de maneira crescente:

Grupo C: são partículas muito finas e coesivas, isto torna a fluidização muito difícil, devido ao fato das forças interpartículas serem maiores que as forças resultantes da ação do gás. A qualidade da fluidização é melhorada através da utilização de agitadores mecânicos ou vibração para evitar a formação de canais preferenciais. Alguns exemplos de materiais deste grupo são a farinha de trigo, amido e pó facial;

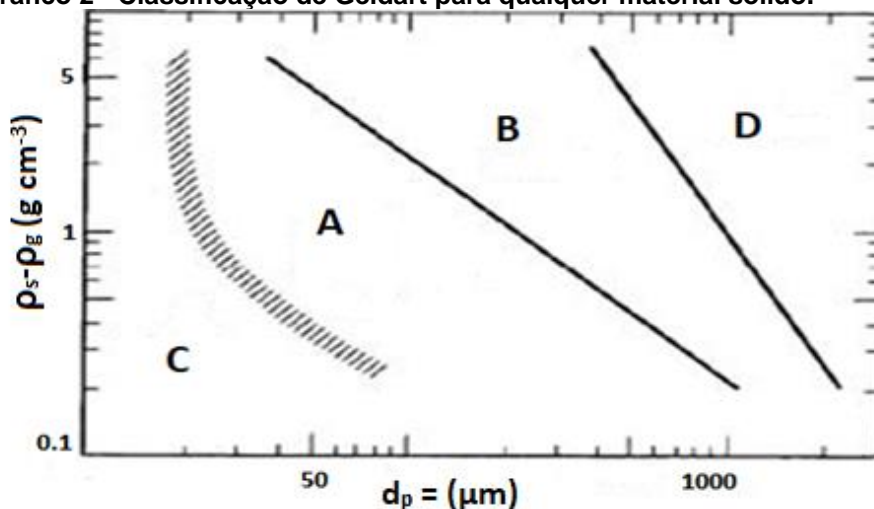
Grupo A: partículas com diâmetro médio ou densidade baixos ($<1400 \text{ kg m}^{-3}$). Estes sólidos fluidizam facilmente e ocorre a expansão do leito antes que haja o aparecimento de bolhas. Como exemplo deste grupo tem-se o *Fluid Catalytic Crackin*;

Grupo B: o sólido típico deste grupo é a areia, as partículas apresentam diâmetro médio de $40 \text{ }\mu\text{m}$ a $500 \text{ }\mu\text{m}$ e densidade entre 1400 a 4000 kg m^{-3} . A fluidização borbulhante é observada neste grupo, sendo o tamanho das bolhas aumentado com a altura do leito e com a velocidade do gás;

Grupo D: são as partículas jorráveis, ou grandes e densas. Isto torna a fluidização mais difícil se utilizar um leito muito profundo. Possui uma pequena expansão do leito, uma baixa mistura de partículas e as forças coesivas interpartículas são muito menores se comparadas as forças de arraste. Como exemplo de partículas deste grupo tem-se os grãos de café e ervilha.

O Gráfico 2 demonstra a classificação de Geldart para qualquer material sólido com densidade e diâmetro médio conhecidos:

Gráfico 2 - Classificação de Geldart para qualquer material sólido.



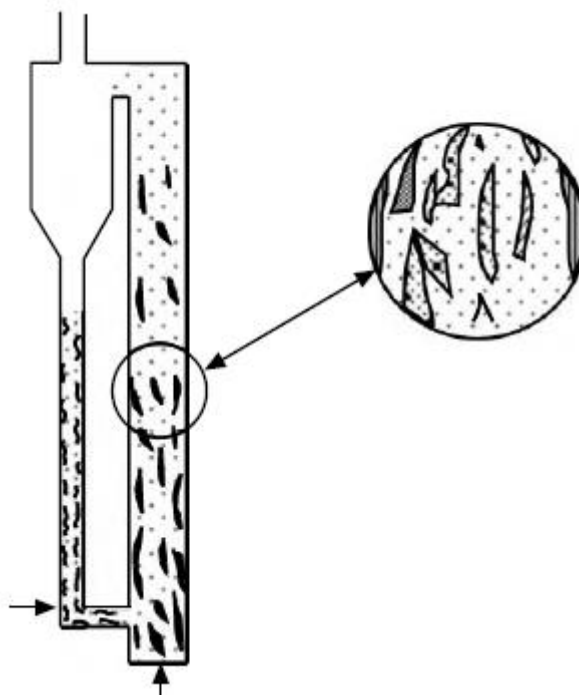
Fonte: Adaptado Geldart (1973) apud Kunii e Levenspiel (1991, p.77)

3.3 LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Segundo Basu (2006), o leito fluidizado circulante (LFC) é definido como uma alta velocidade de contato entre gás e sólidos em suspensão, em que partículas são elutriadas por este gás acima da sua velocidade de transporte e em seguida são recuperadas na base a uma velocidade suficientemente elevada para que seja provocado um refluxo de sólidos que assegure um nível mínimo de uniformidade na temperatura do processo.

A fluidização rápida é um regime que se encontra entre o turbulento e o transporte pneumático. Observa-se neste regime, a não uniformidade da suspensão do aglomerado de partículas sólidas que se movem para cima e para baixo no fluxo de ar. (BASU, 2006, p.35). Pode-se observar este fenômeno na Figura 2:

Figura 2 - Leito fluidizado circulante



Fonte: Basu (2006)

A elevada velocidade de deslizamento entre o gás e os sólidos, a formação e desintegração dos aglomerados de partículas (*clusters*) e as excelentes misturas são as principais características deste regime (BASU, 2006, p.35).

Para Basu (2006), a variação axial e radial da densidade da suspensão é outra característica importante do leito fluidizado rápido. A formação de *clusters* não é uma condição adequada para o leito fluidizado rápido, porém é uma característica importante e necessária neste regime.

3.4 TRANSIÇÃO REGIME TURBULENTO PARA O REGIME RÁPIDO

Basu (2006) cita os regimes gás sólidos que estão abaixo da velocidade de *choking* (U_{ch}), classificados como regimes de *captive bed*. A velocidade de *choking* é utilizada para marcar a transição do regime de *captive bed* para a fluidização rápida.

De acordo com Yang's (1983, apud BASU, 2006, p.38), a correlação desenvolvida para partículas do Grupo A, para temperatura ambiente utilizando colunas de pequeno diâmetro (0,3m) podem ser utilizadas para aproximar a

velocidade U_{ch} , em caldeiras de leito fluidizado, com algumas limitações, através das Equações (1) e (2):

$$\frac{U_{ch}}{\varepsilon_c} = U_t + \sqrt{\frac{2gD(\varepsilon_c^{-4,7}-1)\rho_p^{2,2}}{6,81 \times 10^5 \rho_g^{2,2}}} \quad (1)$$

Em que:

U_{ch} : velocidade de *choking* ($m s^{-1}$);

ε_c : porosidade de *choking* (-);

U_t : velocidade terminal das partículas ($m s^{-1}$);

D : diâmetro (m);

ρ_p : densidade da partícula ($kg m^{-3}$);

ρ_g : densidade do gás ($kg m^{-3}$);

sendo que a correlação se aplica para diâmetros $D < 0,3m$.

$$G_s = (U_{ch} - U_t)(1 - \varepsilon_c)\rho_p \quad (2)$$

Em que:

G_s : taxa de circulação de sólidos ($kg m^{-2}.s^{-1}$);

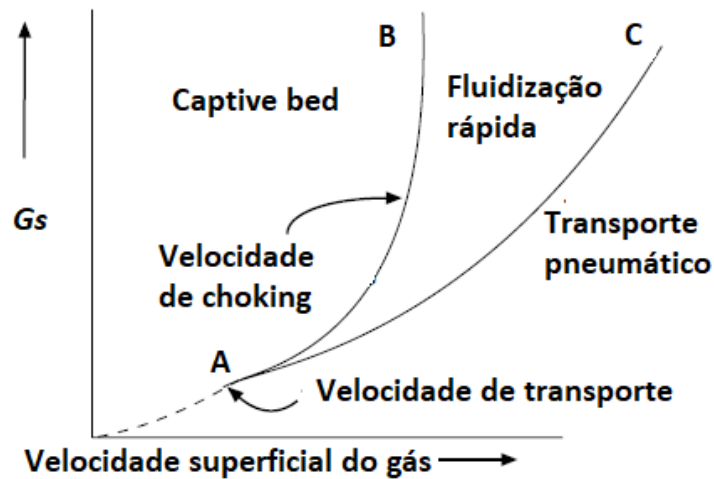
ε_c : porosidade de *choking* (-);

ρ_p : densidade da partícula ($kg m^{-3}$);

U_t : velocidade terminal das partículas ($m s^{-1}$).

Reddy-Karri; Knowlton (1991, apud BASU, 2006, p.38) desenvolveram um diagrama de fluxo qualitativo apresentado pelo Gráfico 3, em que os regimes são mostrados em função da taxa de circulação de sólidos *versus* velocidade superficial do gás. A linha A-B demonstra o limite entre as condições que representam os regimes *captive bed* e o leito fluidizado rápido. Observa-se ainda no Gráfico 3, que para velocidades de circulação mais elevadas, a transição para o regime de fluidização rápida ocorre a altas velocidades.

Gráfico 3 - Fluidização rápida



Fonte: Adaptado Basu (2006)

3.4.1 Velocidade de Transporte

A velocidade de transporte (U_{tr}) é a velocidade mínima para que se ocorra a fluidização rápida, independente da taxa de circulação de sólidos, sendo esta observada no Gráfico 3, representada pelo ponto A (BASU 2016).

Perales et al. (1991, apud BASU, 2006, p.39) desenvolveram uma correlação empírica para o cálculo da velocidade de transporte, com base nos seus experimentos desenvolvidos em uma coluna de 92 mm de diâmetro (Equação 3):

$$U_{tr} = 1,45 \frac{\mu}{\rho_g d_p} Ar^{0,484} \quad (3)$$

Onde:

U_{tr} : velocidade de transporte ($m s^{-1}$);

μ : viscosidade dinâmica do gás ($N.s m^{-2}$);

ρ_g : densidade do gás ($kg m^{-3}$);

d_p : diâmetro médio de partícula (m);

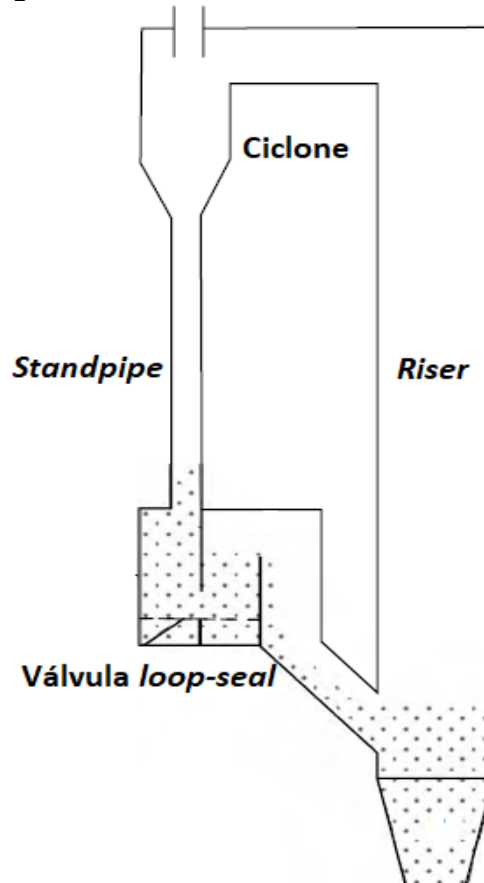
Ar : número de Arquimedes ($Ar = \rho_g \frac{(\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2}$).

Sendo que para a correlação ser aplicada, deve-se o número de Arquimedes estar compreendido entre $20 < Ar < 50.000$.

3.5 FLUIDODINÂMICA E ESTRUTURA LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Para Basu (2006), as condições fluidodinâmicas influenciam em parâmetros como consumo de energia auxiliar, absorção de calor, distribuição de temperatura e inventário de partículas. Com uma interpretação exata dos fenômenos que envolvem a fluidodinâmica para o leito fluidizado circulante, torna-se possível sua correta operação e desenvolvimento pleno do regime. A Figura 3 representa o leito fluidizado circulante, bem como suas principais partes integrantes.

Figura 3 – Estrutura do leito fluidizado circulante



Fonte: Adaptado Basu (2006)

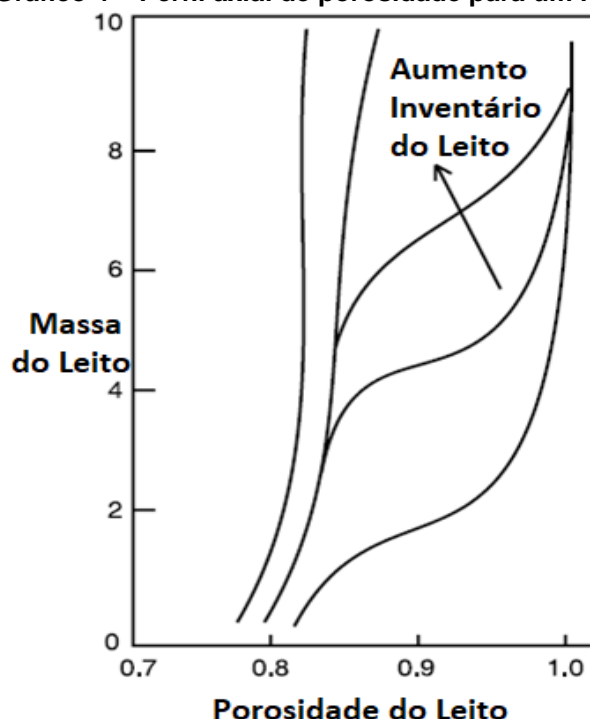
3.5.1 Perfil Axial de Porosidade

Um leito fluidizado rápido não é uniforme na direção axial e lateral. A distribuição axial da porosidade média em uma seção transversal de sólidos para um leito circulado, pode ser observada no Gráfico 4, em que se pode verificar que há uma

mudança de perfil, dando um ponto de inflexão a uma determinada altura (BASU, 2016).

Kwauk et al. (1986, apud BASU, 2006, p.44) explicaram estes fenômenos com base na difusão do *cluster* na direção axial e conclui-se que a distribuição axial da porosidade é do formato da letra S, como pode ser observado na Gráfico 4. Este perfil é para o Grupo A e Grupo B de partículas proposto por Geldart.

Gráfico 4 – Perfil axial de porosidade para um leito



Fonte: Adaptado Basu (2006)

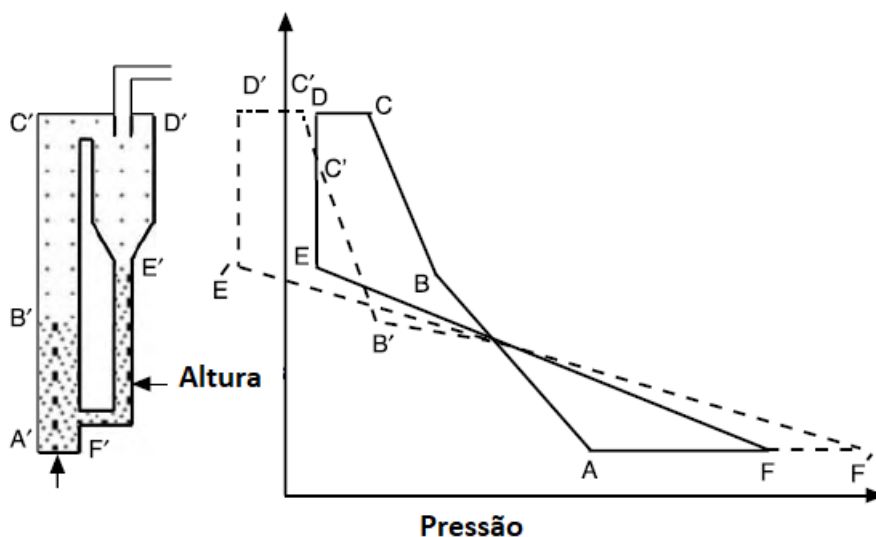
3.5.2 Efeitos da Taxa de Circulação no Perfil da Porosidade

O perfil da porosidade demonstra uma mudança em seu gradiente, conforme discutido no item 3.5.1. Neste ponto de inflexão ocorre a separação entre as regiões mais e menos densas de um leito fluidizado rápido, sendo que estão em função da taxa de circulação de sólidos e a quantidade de sólidos que estão presentes no sistema. Este efeito é explicado através do balanço de pressão em torno do leito (BASU, 2006).

A seção inferior do leito fluidizado rápido é mais densa, com isto há maiores quedas de pressão por unidade de altura do leito com relação a parte superior que é mais fina. Para uma dada quantidade de inventário de partículas no leito, estes sólidos

são distribuídos entre o leito e o ponto de retorno de tal modo que a pressão decresce através destes dois pontos da alça e assim se equilibram, podendo este fenômeno ser observado na Figura 4, em que há um perfil de pressão fechado em torno de um *loop* para um leito fluidizado circulante (BASU, 2006).

Figura 4 - Perfil de pressão



Fonte: Adaptado Basu (2006).

A taxa de fluxo de sólidos aumenta quando há o acréscimo na aeração, a pressão no ponto F (com referência a A) aumenta e a queda de pressão através do leito de partículas em reflexo aumenta dos pontos (EF) para (E'F'). (BASU, 2006, p.46).

Observa-se que há uma queda de pressão no ciclone, sendo ela representada pelos pontos (CD) para (C'D') na figura 5. Para operações estáveis, o balanço de pressão em torno deste processo é:

$$\Delta P_{F-A} + \Delta P_{A-B} + \Delta P_{B-C} + \Delta P_{C-D} = \Delta P_{D-E} + \Delta P_{E-F} \quad (4)$$

Em que:

ΔP_{F-A} : queda de pressão no ponto F-A (N m^{-2});

ΔP_{A-B} : queda de pressão no ponto A-B (N m^{-2});

ΔP_{B-C} queda de pressão no ponto B-C (N m^{-2});

ΔP_{C-D} : queda de pressão no ponto C-D (N m^{-2});

ΔP_{D-E} : queda de pressão no ponto D-E (N m^{-2});

ΔP_{E-F} : queda de pressão no ponto E-F ($N\ m^{-2}$).

Kunni e Levenspiel (1991) desenvolveram uma correlação para a distribuição axial da porosidade, sendo descrita por:

$$\frac{\varepsilon_d - \varepsilon}{\varepsilon_d - \varepsilon_a} = \exp[-a(h - h_i)] \quad (5)$$

Sendo:

ε_a : porosidade (-);

ε_d : porosidade na fase diluída (-);

h : altura a partir da *base loop-seal* equipamento (m);

h_i : altura do ponto de inflexão (m).

Em que $h > h_i$, e ($aU = 2$ até $5\ s^{-1}$) para diâmetro de partícula menor que $70\ \mu m$ e ($aU = 4$ até $12\ s^{-1}$) para diâmetro de partícula maior que $88\ \mu m$.

Kunni e Levenspiel (1991) descrevem que como alternativa para leitos fluidizados rápidos, pode-se correlacionar a velocidade superficial com dados experimentais já que a porosidade decai constantemente. Sendo que porosidade (ε_a) situa-se entre 0,78 até 0,88.

De acordo com Basu (2006), em leitos fluidizados rápidos com injeção de ar secundário, o ponto de inflexão h_i é notado logo abaixo. Assim o comportamento assintótico da porosidade na fase diluída (ε_d) pode ser correlacionado quando se dá o início da formação de *clusters*. Sendo assim pode-se aproximar ε_d como o *chocking* de vazios ε_c , por meio da Equação (6):

$$\varepsilon_e = \varepsilon_d - (\varepsilon_d - \varepsilon_a)\exp[-a(H - h_i)] \quad (6)$$

Sendo:

ε_e : porosidade cálculo (-);

ε_a : porosidade (-);

ε_d : porosidade na fase diluída (-);

h : altura a partir da *base loop-seal* equipamento (m);

h_i : altura do ponto de inflexão (m);

H : altura até o ponto de distribuição (m).

Significa que integrando a equação anterior entre H e h_i , pode-se obter a porosidade do leito abaixo do ponto de inflexão (ε_s), pela Equação (7):

$$\varepsilon_s = \varepsilon_d - \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_e}{a(H - h_i)} \quad (7)$$

Em que:

ε_s : porosidade do leito abaixo ponto inflexão (-);

ε_e : porosidade de cálculo (-);

ε_a : porosidade (-);

ε_d : porosidade na fase diluída (-);

h_i : altura do ponto de inflexão (m);

H: altura até o ponto de distribuição (m).

Assim a massa de sólidos pode ser encontrada através da Equação (8):

$$W = A\rho_p[h_i(1 - \varepsilon_a) + (H - h_i)(1 - \varepsilon_s)] \quad (8)$$

Em que:

W: massa de sólidos (kg);

ε_s : porosidade do leito abaixo ponto inflexão (-);

ε_e : porosidade de cálculo (-);

ε_a : porosidade (-);

ε_d : porosidade na fase diluída (-);

h_i : altura do ponto de inflexão (m);

H: altura até o ponto de distribuição (m);

ε_s : porosidade do leito abaixo ponto inflexão (-).

Segundo Basu (2006), a porosidade no topo da coluna possui um valor muito elevado, as partículas se encontram completamente dispersas e não há refluxo, e a porosidade da suspensão gás-sólido pode ser aproximada por $[G_s/\rho_p U]$, assim estimada a partir da Equação (9):

$$(1 - \varepsilon_e)\rho_p = \left[\frac{G_u}{U_s} + \frac{G_d}{U_d} \right] \quad (9)$$

Sendo:

ϵ_e : porosidade de cálculo (-);

ρ_p : densidade da partícula (kg m^{-3});

G_u : fluxo de sólidos ascendente ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

G_d : fluxo de sólidos descendentes ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

U_s : velocidade linear ascendente dos sólidos (m s^{-1});

U_d : velocidade linear descendente dos sólidos (m s^{-1}).

Basu (2006) ainda representa que o perfil de porosidade acima do nível de ar secundário, pode ser calculado através de uma correlação, fornecida pela Equação (10):

$$\frac{c}{(h-h_i)^n} \quad (10)$$

Em que (c) e (n) são constantes do equipamento, h é a altura medida a partir da *base loop-seal* do equipamento e h_i é a altura do ponto de inflexão.

3.5.2.1 Efeito do inventário de partículas

Na operação do leito fluidizado circulante, muitas vezes é difícil alterar a velocidade do gás de circulação, forçando assim os operadores procurarem outros parâmetros, neste caso o inventário de partículas (BASU, 2006, p.48).

Yue et al. (2005), apud BASU (2006, p.48) mostraram que realizando a mudança no inventário de partículas torna-se possível influenciar a densidade da suspensão. Alterando assim o inventário de partículas sólidas que passam através da válvula *loop-seal*, pode-se ocasionar um aumento na densidade da suspensão presente no leito.

3.5.2.1.1 Distribuição da porosidade no leito fluidizado rápido

Basu (2006) cita que o gás de fluidização (com seus sólidos dispersos no meio), estando em movimentação na coluna, possui uma velocidade que deve ser

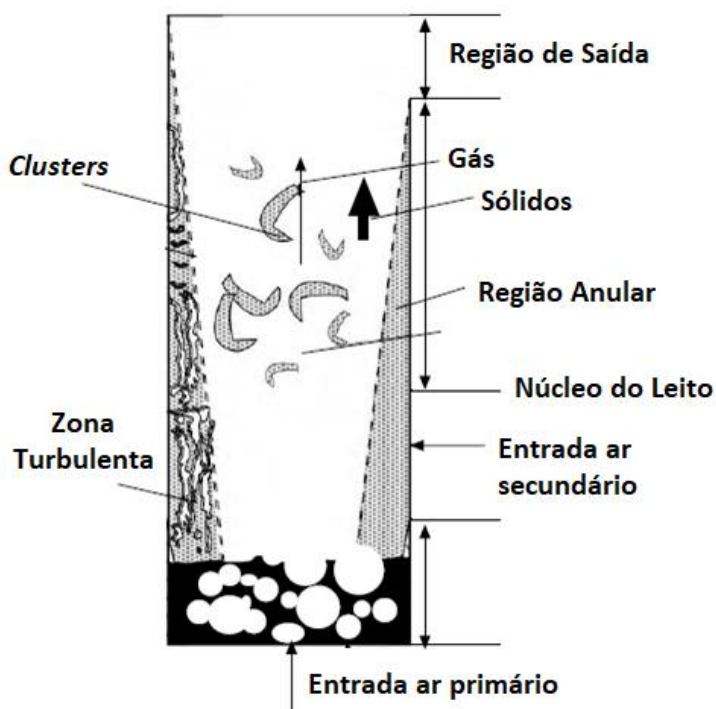
diferente nas diversas regiões do leito. Esta velocidade pode ser observada em duas áreas, sendo a velocidade no núcleo do leito e a velocidade próxima as paredes do leito.

Segundo Basu (2006), durante o processo de fluidização a tendência é que haja a mistura igual de todos os sólidos, porém alguns sólidos acabam descendo pelo leito formando os aglomerados conhecidos como *clusters*. Estes acompanham o movimento como um único corpo por um período até de dissolverem novamente. Além de que a concentração dos aglomerados é maior perto das paredes do leito, do que no centro do mesmo devido a diferença nas velocidades das regiões do leito.

O *riser* de um leito fluidizado circulante pode ser dividido em duas regiões: núcleo e região anular. A velocidade do gás na região anular é baixa, enquanto que no núcleo é superior a velocidade superficial que escoar por meio do *riser*.

De acordo com Basu (2006), os sólidos se movem para cima através da região do núcleo em uma suspensão diluída, com a presença de alguns *clusters*. Quando os mesmos começam a se derivar devido às interações fluidodinâmicas, estes são expostos a uma velocidade de gás muito baixas dificultando assim seu arraste. Com isto, os *clusters* começam a cair na região anular de baixa velocidade, a qual fica próximo as paredes do leito. Este fenômeno pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Estrutura leito fluidizado circulante e suas regiões



Fonte: Adaptado Basu (2006)

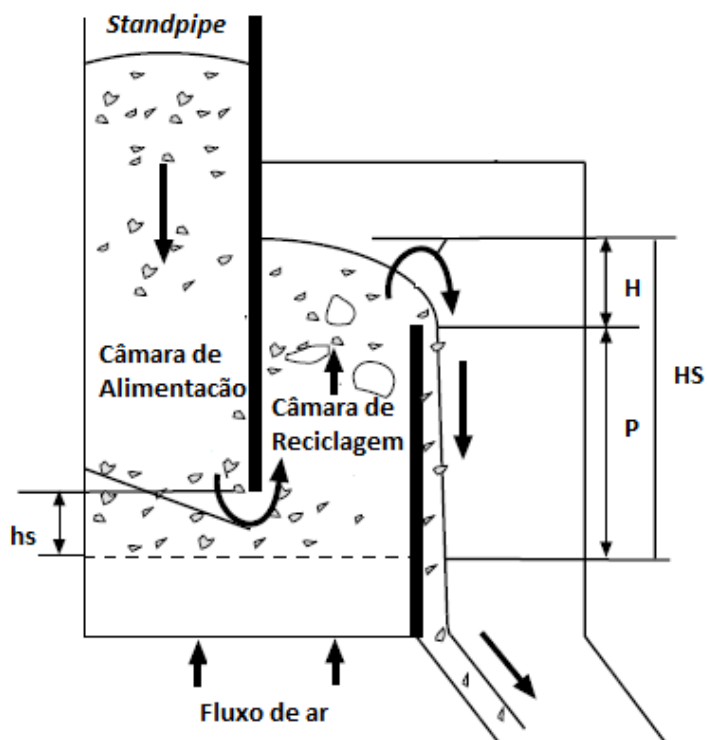
3.6 VÁLVULA LOOP-SEAL

A válvula *loop-seal* é extensamente utilizada em leitos fluidizado circulantes (CFB), sendo a mesma constituída por duas seções: câmara de alimentação e câmara de reciclagem. (BASU, 2006, p.418).

Segundo Basu (2006), a câmara de alimentação, a qual possui contato direto com a tubulação vertical, fornece os sólidos para câmara de reciclagem, os quais são transferidos para o *riser*, fazendo deste processo um ciclo.

Os sólidos da câmara de alimentação, segundo Basu (2006), movem-se horizontalmente através da parede que separa as duas câmaras, em seguida a câmara de reciclagem fluidiza estes sólidos, promovendo os mesmos a uma movimentação capaz de transbordar a barragem presente. Com isto, os mesmos retornam ao leito, tudo isto se deve a ação da força da gravidade. As câmaras de alimentação e de reciclagem, bem como a barreira a ser superada, podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 – Válvula *loop-seal*, câmara de alimentação e reciclagem.



Fonte: Adaptado Basu (2006)

3.6.1 Balanço de Pressão na Válvula *loop-seal*

De acordo com Basu (2006), o balanço de pressão para válvula *loop-seal* é dado pela Equação (11):

$$P_s - \Delta P_{dist,S} - \Delta P_{sb} > P_0 - \Delta P_{dist,b} - \Delta P_b \quad (11)$$

Em que:

P_s : pressão do ar no *plenum* da válvula *loop-seal* (N m^{-2});

P_0 : pressão do ar no *plenum* do leito principal (N m^{-2});

$\Delta P_{dist,S}$: queda de pressão na distribuição da válvula *loop-seal* (N m^{-2});

$\Delta P_{dist,b}$: queda de pressão na distribuição do leito principal (N m^{-2});

ΔP_b : queda de pressão do *riser* onde os sólidos da reciclagem entram (N m^{-2});

ΔP_{sb} : queda de pressão do leito fluidizado na válvula *loop-seal* (N m^{-2}).

A queda de pressão ΔP_{sb} pode ser estimada pela Equação 12, (Basu, 2006).

$$\Delta P_{sb} = (1 - \varepsilon_s)\rho_p H_s g \quad (12)$$

Em que $\varepsilon_s = 0,5$, sendo este já pré-definido e H_s é a altura de sólidos na válvula acima da placa distribuidora.

Segundo Basu (2006), na seção inferior na qual ocorre a entrada dos sólidos na válvula *loop-seal*, permanece em regime turbulento. Dessa forma, a pressão ΔP_b pode ser descrita pela Equação (13).

$$\Delta P_b = (1 - \varepsilon_t)\rho_p H_t g \quad (13)$$

em que H_t é a altura do leito até a saída da válvula *loop-seal* e a porosidade para leito turbulento é fornecido com o valor de $\varepsilon_t = 0,8$.

3.6.2 Fluxo de Ar através da Válvula *loop-seal*

Basu (2006) cita em seus estudos que em algumas situações, ar deve ser injetado através da base do tubo vertical, pois uma certa quantidade de ar da câmara

de reciclagem ocasiona uma movimentação na mesma, atendo-se ao fato que a velocidade do ar na câmara não deve exceder o valor de mínima fluidização para as partículas em circulação no processo.

A câmara de reciclagem é mantida sob fluidização a uma relação entre velocidade superficial e velocidade de mínima fluidização superior a 1,25 (BASU, 2006).

Alguns efeitos do fluxo de ar na válvula *loop-seal* sobre a taxa de recirculação de sólidos são demonstrados por Basu e Cheng (2000 apud BASU, 2006, p.429), tendo:

- Aumento da velocidade de fluidização através da câmara de reciclagem;
- maior aeração na parede vertical da câmara de alimentação;
- aumento no inventário de partículas suportado;
- possibilidade de utilizar partícula mais fina;
- maior velocidade do gás no *riser*.

3.7 LEITO FLUIDIZADO PULSANTE

Leito fluidizado com adição de ar pulsado envolve o uso de uma corrente de gás intermitente, a qual flui através de um leito de partículas, produzindo movimentação e mudanças no comportamento da fluidodinâmica do processo (IRELAND; PITT; SMITH, 2016, p. 108).

Zhang e Koksall (2006) utilizaram um leito com 0,17 m de diâmetro e partículas de sílica e areia com diâmetro entre 37 μm e 700 μm para investigar os efeitos da pulsação na transferência de calor e na fluidodinâmica do sistema. Uma válvula solenoide forneceu o ar pulsado para o sistema a uma frequência de 1 a 10 Hz. Obteve-se como resultado para o Grupo B da classificação de Geldart de partículas, um aumento de 2 a 3 vezes no coeficiente de transferência de calor para uma frequência de pulsação de 1 Hz.

Bizhaem e Tabrizi (2013) investigaram a relação da fluidodinâmica com leito fluidizado pulsante, utilizando 3 tipos de partículas, sendo sílica com diâmetro médio de 196 μm , alumina com diâmetros médios de 95 μm e 100 μm , em uma coluna de 0,11m de diâmetro. Os pulsos de ar foram introduzidos no leito por meio de uma

válvula solenoide conectada a um sistema de aquisição de dados, utilizando frequências de pulsação de 1 a 10 Hz. Os resultados mostraram que a pulsação proporciona a redução na velocidade de mínima fluidização e a possibilidade de se trabalhar com partículas finas.

Ireland, Pitt e Smith (2016) realizaram estudos com leito fluidizado com o intuito de avaliar seu comportamento com a adição de ar pulsado. A justificativa dos pesquisadores para realizar estes estudos é que pesquisas com leito fluidizado pulsante têm demonstrado melhoras na transferência de massa e de calor e desta forma, diminuindo o consumo de energia para velocidades de mínima fluidização. Para valores mínimos de fluidização, utilizando a pulsação, tornou-se possível obter recirculação de sólidos, proporcionando assim trabalhar com vazões muito baixas de ar dependendo do método aplicado e das frequências requeridas.

Os pesquisadores realizaram a comparação do sistema contínuo e com pulsação, com uma velocidade de gás de 3 m s^{-1} e utilizando a frequência de 3 Hz, desta forma discutindo os efeitos da mínima fluidização, velocidade e as características do leito. Como resultados obtiveram a melhora na qualidade de fluidização e redução na velocidade de mínima fluidização.

A válvula *loop-seal* é amplamente aplicada nos leitos fluidizados circulantes, inserir ar pulsado nesta válvula e avaliar os efeitos sobre suas duas câmaras mostrou-se uma opção interessante para estudo, pois pesquisadores já comprovaram que a aplicação de ar pulsado proporciona a redução da velocidades de mínima fluidização e com isto avaliar os efeitos sobre a válvula *loop-seal* pode resultar em descobertas interessantes das influências que o sistema pode sofrer com a aplicação de pulso.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, será descrito o procedimento experimental, os equipamentos envolvidos, bem como os materiais utilizados para execução dos ensaios.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

No seguinte estudo, foram realizados experimentos na Unidade de Fluidização Rápida a Frio, a qual está localizada no Laboratório de Processos Termoquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Ponta Grossa. O sistema experimental (Fotografia 1) é constituído de duas colunas, sendo a primeira delas o *riser* (1) construída de aço carbono e acrílico, possui diâmetro interno de 0,078 m e altura de 2,7 m. Já o *standpipe* (2) construído do mesmo material possui diâmetro interno de 0,059 m, e na parte inferior do mesmo localiza-se a válvula *loop-seal* (3), a qual possui uma seção quadrada interna com 0,059 m de lado, sendo a altura da barragem na câmara de 0,11 m. O sistema possui ainda um ciclone (4), responsável pela separação gás-sólido. Para coleta de amostras, utiliza-se um coletor instalado no *standpipe* do leito.

O ar utilizado para fluidização das partículas é alimentado na base do *riser* proveniente de um soprador do tipo radial (5) da marca AEROMACK, modelo CRE-03, com motor de 4cv de potência.

Os valores de pressão foram obtidos por meio de um sistema de medição de pressão manométrico, sendo constituído por medidores de pressão do tipo tubo em “U” (6).

Para controle do sistema de pulsação, utilizou-se uma válvula solenoide de ¼ de polegada, responsável pela geração de ar pulsado, a qual está conectada a um sistema de aquisição de dados (7) composto por uma placa de aquisição de dados (marca NATIONAL INSTRUMENTS™, modelo NI USB 6211), *software* LabVIEW™ versão 10.0 e um computador Core i3, 4 GB de RAM.

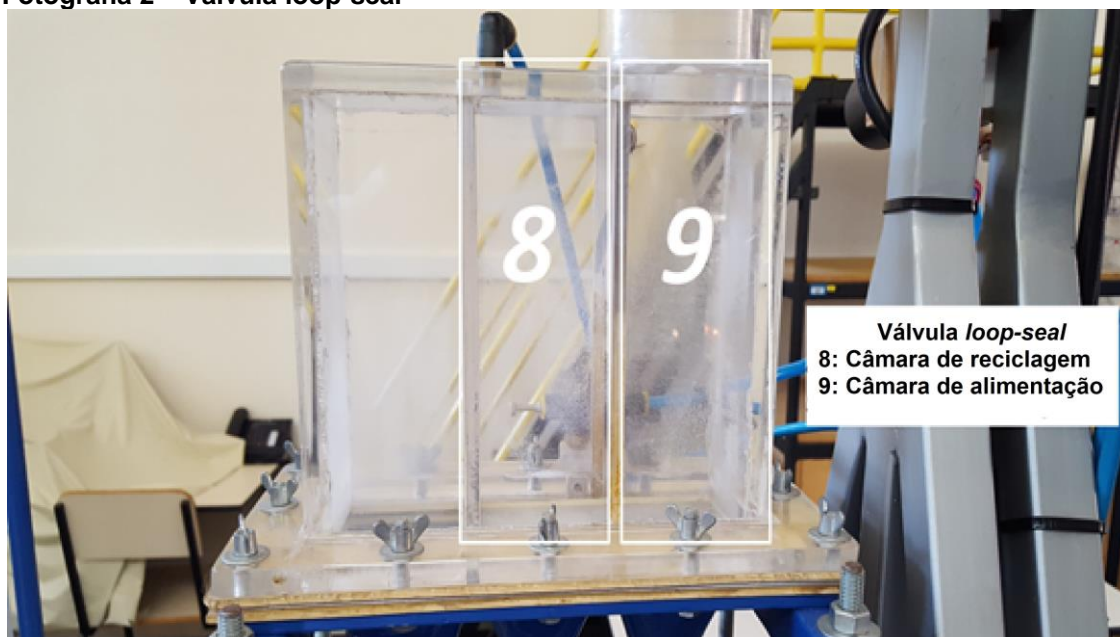
Fotografia 1 – Unidade de fluidização rápida a frio e seus componentes.



Fonte: autoria própria

Na Fotografia 2, observa-se em detalhe a válvula *loop-seal* e suas duas câmaras, sendo a de alimentação e de reciclagem.

Fotografia 2 – Válvula loop-seal



Fonte: autoria própria

4.2 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

O trabalho foi realizado utilizando areia de fundição (Fotografia 3), a qual pertence ao grupo B de Geldart. Para a análise granulométrica foram utilizadas peneiras da série Tyler com aberturas de 150 e 212 μm . E a densidade foi determinada através de picnometria, sendo este método baseado no deslocamento do líquido pela adição de partículas (Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedades da areia de fundição

Características do Material	
Diâmetro médio de Sauter	183 μm
Densidade de Partícula	2712 kg m^{-3}

Fonte: autoria própria.

Fotografia 3 – Areia fundição 183 μm .

Fonte: autoria própria.

4.3 ORGANIZAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.3.1 Organização experimental

Foram realizados seis ensaios experimentais, com inventário de partículas fixo em 4 kg, para as câmaras de alimentação e de reciclagem, como mostram os Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Bloco 1 experimentos.

Bloco 1 – Câmara de alimentação	
Experimento	Fluxo
1	contínuo
2	$f_p = 1 \text{ Hz}$
3	$f_p = 2 \text{ Hz}$

Fonte: autoria própria.

Tabela 3 – Bloco 2 experimentos.

Bloco 2 – Câmara de reciclagem	
Experimento	Fluxo
4	contínuo
5	$f_p = 1 \text{ Hz}$
6	$f_p = 2 \text{ Hz}$

Fonte: autoria própria.

Em todos os experimentos realizados foram utilizadas vazões de aeração (Tabela 4), com o intuito de observar o comportamento do leito para as diversas situações e assim obter um padrão para análise.

Tabela 4 – Vazões de aeração.

Fluxo	20	24	28	32	36	40
contínuo	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹
Sistema	8	12	16	20	24	28
com pulsação	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹	sL min ⁻¹

Fonte: autoria própria.

4.3.2 Procedimento experimental

Antes de se iniciar os testes, foram inseridos 4 kg de areia no *riser*. Após esse procedimento, ligou-se o soprador e ajustou-se a uma velocidade de 4 m s⁻¹. O motor do soprador foi regulado por um inversor de frequência. Em seguida, realizou-se a checagem do nível de água dos manômetros, e verificou-se todos os instrumentos e válvulas estavam operando corretamente.

Ajustou-se em cada rotâmetro a vazão desejada, sendo dividida de forma igual para cada instrumento de medição. Aguardou-se cerca de 10 minutos para haver estabilização do sistema e iniciou-se os experimentos.

Para todos os blocos de experimentos, realizou-se a coleta de amostra durante 10 segundos do material presente no leito para realização do cálculo da taxa de recirculação de sólidos (Gs).

Os valores de pressão foram coletados a partir do medidor do tipo tubo em U e seus valores registrados.

4.4 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais foram organizados em gráficos, contendo as informações necessárias para realização do estudo sobre a influência do sinal de

frequência pulsado para os sistemas na câmara de alimentação e na câmara de reciclagem.

A taxa de recirculação de sólidos (G_s) foi obtida por meio do cálculo da Equação 14:

$$G_s = \frac{m_{areia}}{[(1000) \times (t_{am}) \times (A_{t-riser})]} \quad [\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}] \quad (14)$$

Em que:

m_{areia} : massa da areia (kg);

t_{am} : tempo de amostragem (s);

$(A_{t-riser})$: área de seção transversal do riser ($4,78 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$).

Para obter os resultados referentes ao número de fluidização, utilizou-se a Equação 15 para cálculo da velocidade na válvula *loop-seal*.

$$u_{loop-seal} = \frac{V_A}{A_{loop-seal}} \quad (15)$$

Em que:

$u_{loop-seal}$: velocidade na válvula *loop-seal* (m s^{-1});

V_A : vazão de aeração ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$);

$A_{loop-seal}$: área da seção transversal da válvula *loop-seal* ($6,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$).

Em seguida aplicou-se os valores encontrados na Equação 16, para obter-se o número de fluidização.

$$N_f = \left[\frac{(u_{loop-seal})}{u_{mf}} \right] \quad (16)$$

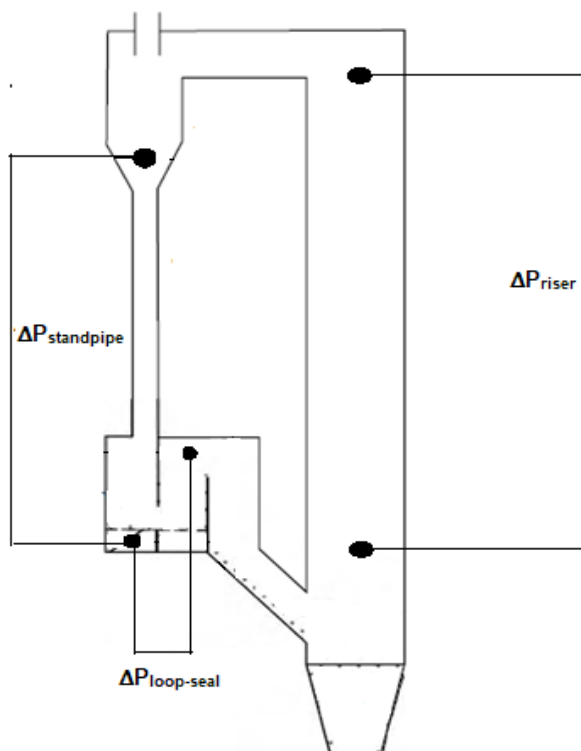
Em que:

N_f : número de fluidização;

u_{mf} : velocidade do ar na mínima fluidização ($3,5 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$).

Para o cálculo dos valores de queda de pressão para análise do sistema obteve-se os valores de pressão através das tomadas nos seguintes pontos observados na Figura 7 e posterior cálculo do diferencial entre cada ponto para obter os valores de ΔP_{riser} , $\Delta P_{\text{standpipe}}$ e $\Delta P_{\text{loop-seal}}$.

Figura 7 - Pontos de tomada de pressão



Fonte: Adaptado Basu (2006).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

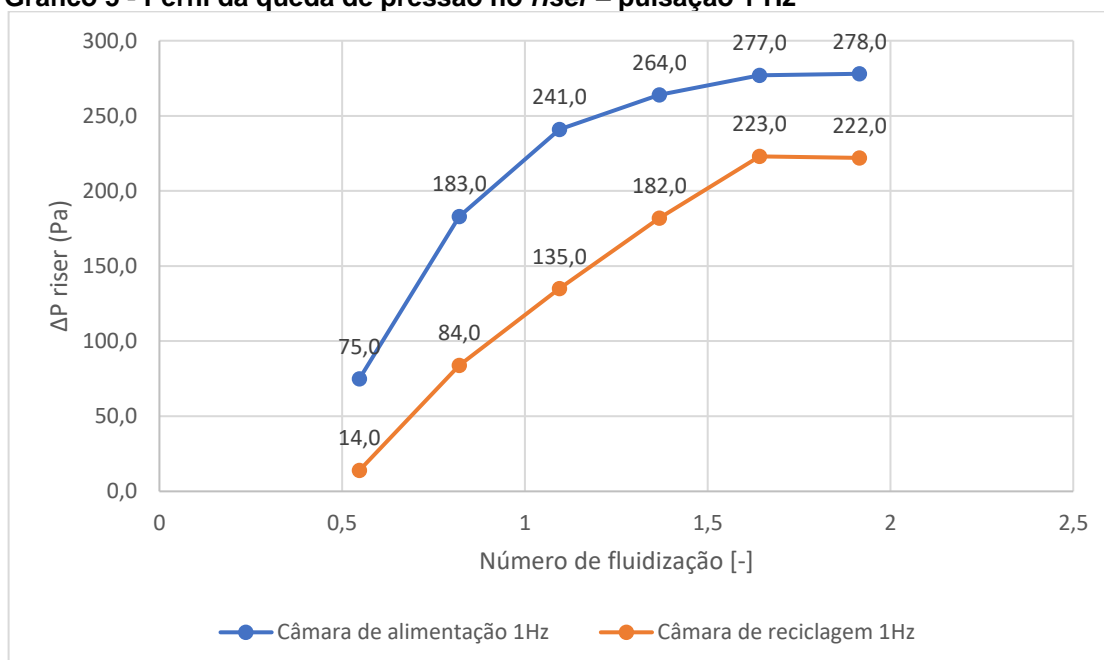
Nesta seção são demonstrados e analisados os resultados experimentais dos ensaios realizados na Unidade de Fluidização Rápida a Frio. Os dados obtidos são referentes as análises dos seguintes parâmetros:

- Fluxo contínuo e pulsação com frequência de 1 Hz e 2 Hz na câmara de alimentação;
- Fluxo contínuo e pulsação com frequência de 1 Hz e 2 Hz na câmara de reciclagem.

5.1 SISTEMA COM FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO DE 1 HZ

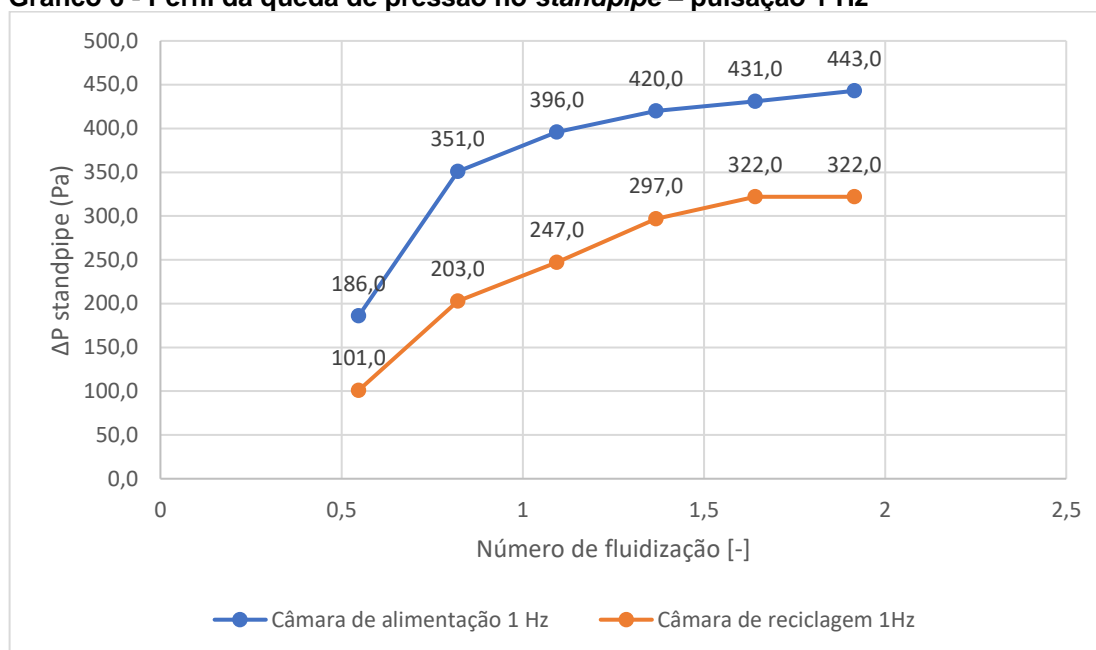
Os Gráficos 5 a 7 mostram os perfis da queda de pressão *versus* o número de fluidização no *riser*, no *standpipe* e na válvula *loop-seal*, respectivamente, utilizando frequência de pulsação de 1 Hz.

Gráfico 5 - Perfil da queda de pressão no *riser* – pulsação 1 Hz



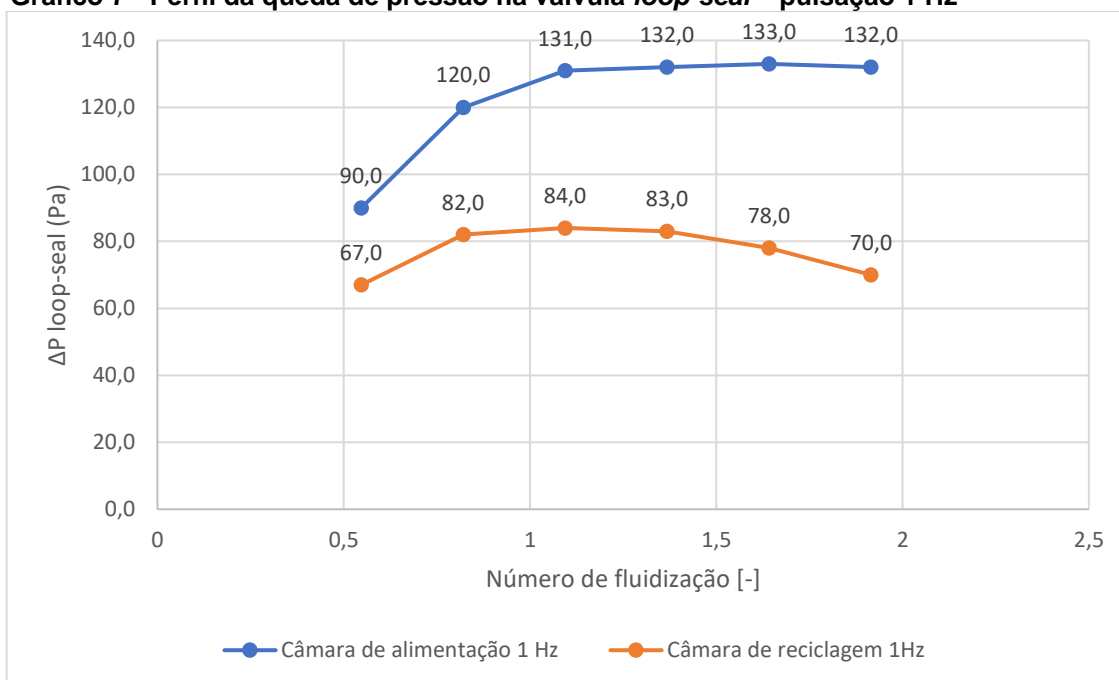
Fonte: autoria própria.

Gráfico 6 - Perfil da queda de pressão no *standpipe* – pulsação 1 Hz



Fonte: autoria própria.

Gráfico 7 - Perfil da queda de pressão na válvula *loop-seal* – pulsação 1 Hz



Fonte: autoria própria.

Observa-se nos Gráficos referentes à pulsação de 1 Hz que a pressão na câmara de alimentação sempre será maior que na câmara de reciclagem devido à porosidade ser maior na câmara de alimentação do que na de reciclagem, isto deve-

se ao fato que a concentração de massa efetiva na alimentação é muito maior, onde há maior compactação a pressão sempre será maior que na reciclagem.

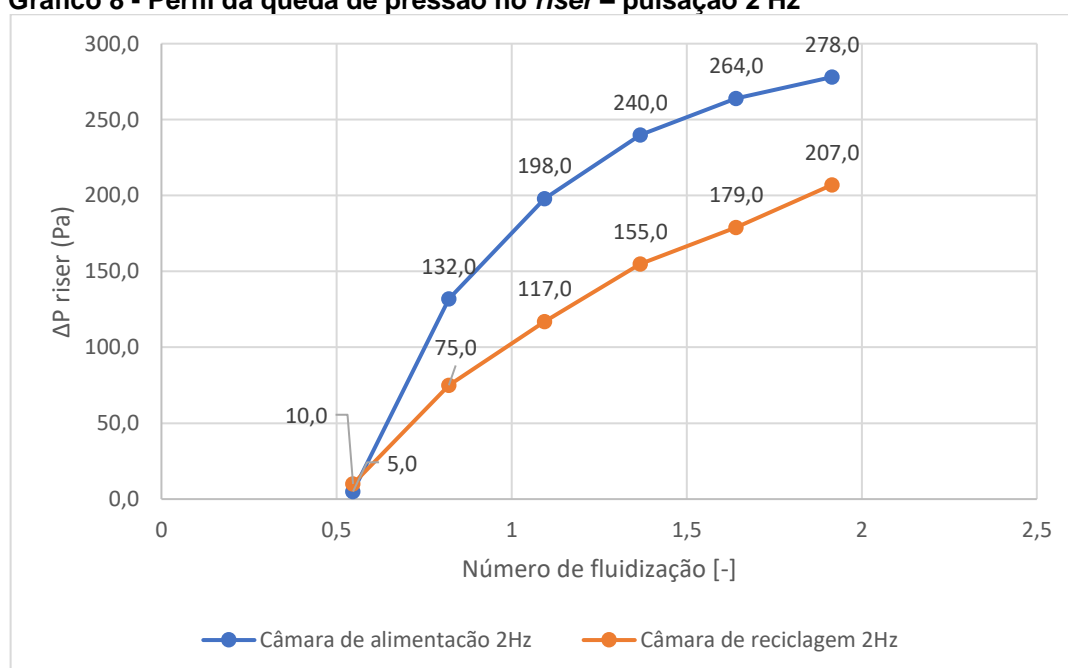
Há uma queda de pressão no Gráfico 7 na válvula *loop-seal* e uma reversão no sentido do gráfico para a câmara de reciclagem com pulso de 1 Hz de frequência. Isto ocorre porque é uma região onde há maior quantidade de ar e desta forma uma maior probabilidade de formação de bolhas, assim a porosidade é muito menor, desta forma fica evidente que existe um valor máximo de número de fluidização que pode ser utilizado na câmara de reciclagem.

No Gráficos 5, 6 e 7 observa-se que os valores de número de fluidização são inferiores a 1, comprovando que para experimentos com ar pulsado se torna possível retirar o sistema do estado estacionário, mesmo não tendo alcançado a velocidade de mínima fluidização, comprovando assim os estudos realizados por Bizhaem e Tabrizi (2013), citados no item 3.7 do presente trabalho.

5.2 SISTEMA COM FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO DE 2 HZ

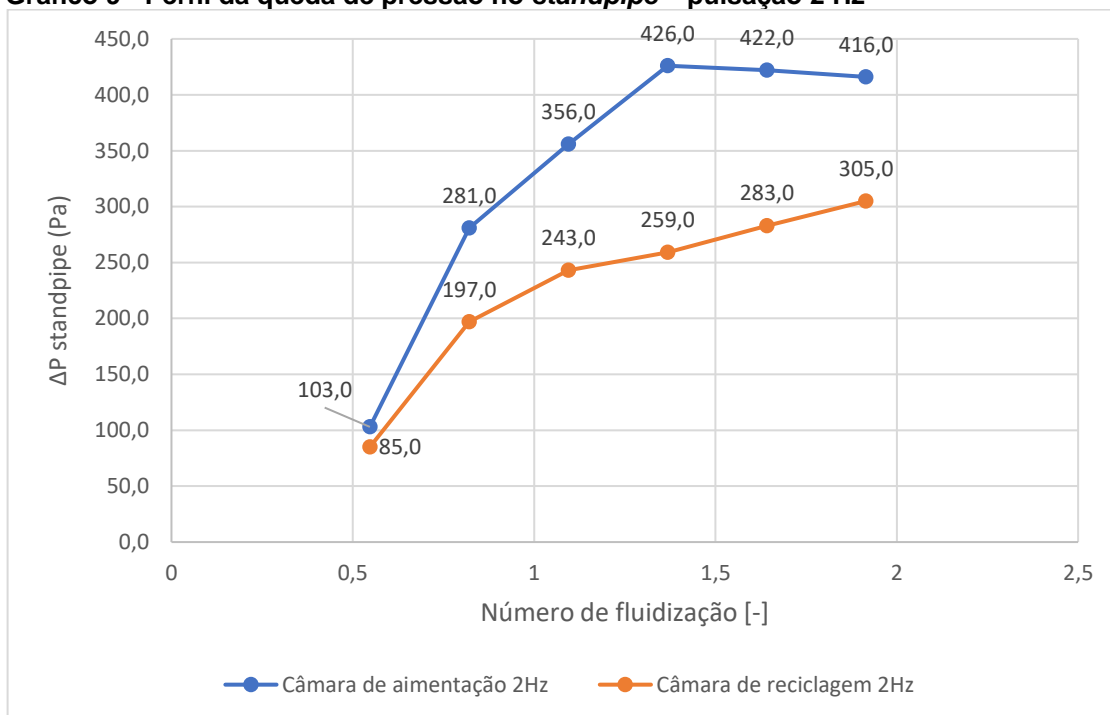
Os Gráficos 8 a 10 ilustram os perfis da queda de pressão *versus* o número de fluidização no *riser*, no *standpipe* e na válvula *loop-seal*, respectivamente, utilizando frequência de pulsação de 2 Hz.

Gráfico 8 - Perfil da queda de pressão no *riser* – pulsação 2 Hz



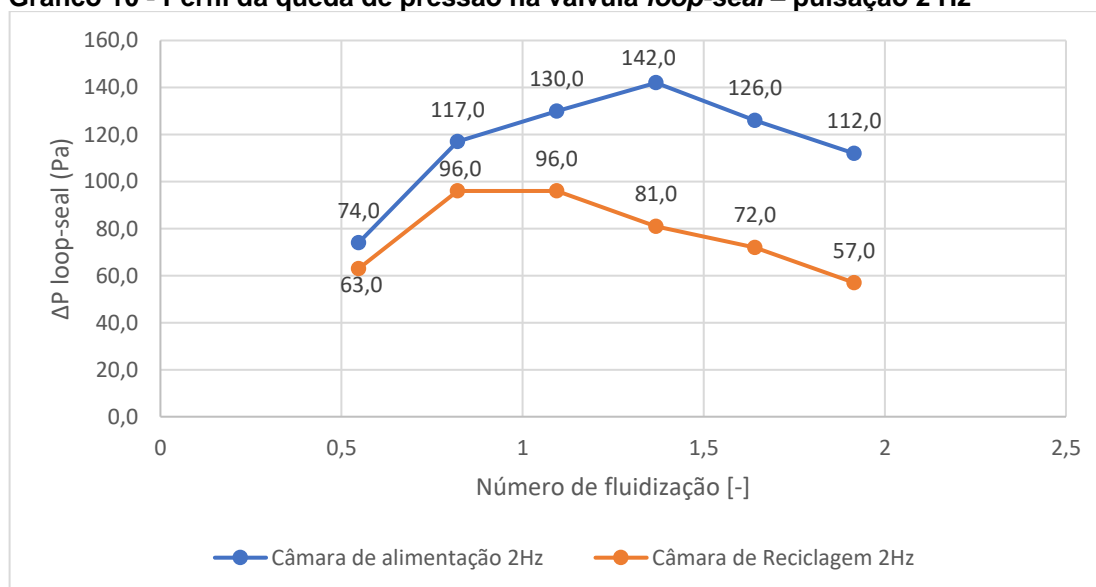
Fonte: autoria própria

Gráfico 9 - Perfil da queda de pressão no *standpipe* – pulsação 2 Hz



Fonte: autoria própria

Gráfico 10 - Perfil da queda de pressão na válvula *loop-seal* – pulsação 2 Hz



Fonte: autoria própria

Para a frequência de pulsação de 2 Hz, verificou-se que para sistemas com aplicação de ar pulsado foi possível obter resultados em que ocorreu o início de processo sem ter atingido a velocidade de mínima fluidização, comprovando os estudos realizados por Ireland, Pitt e Smith (2016). Para sistemas contínuos não seria possível iniciar o experimento sem que se atinja a velocidade mínima de fluidização.

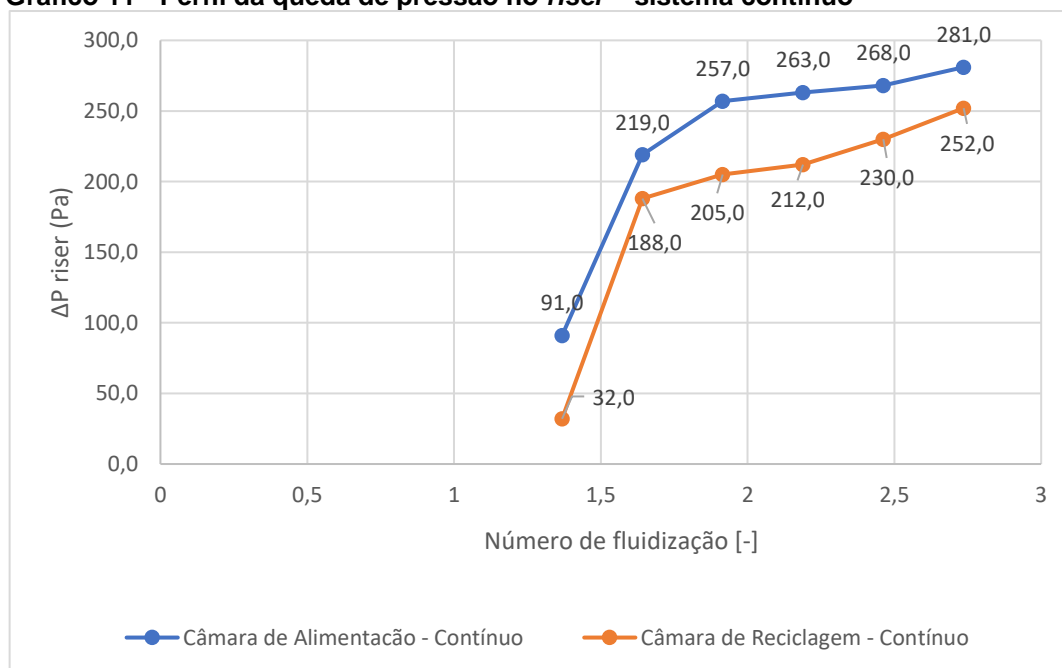
A tendência das linhas se manteve similar com a pulsação de 1 Hz para os gráficos do *riser* e *standpipe*, com uma leve queda no caso da válvula *loop-seal*, demonstrando a existência de um valor máximo de número de fluidização, a qual acima deste não ocasionará alterações significativas no sistema.

Por outro lado, verifica-se que a queda de pressão do *riser* é diretamente proporcional à concentração de sólidos no mesmo, comprovando o que foi discutido para os experimentos de pulsação 1 Hz.

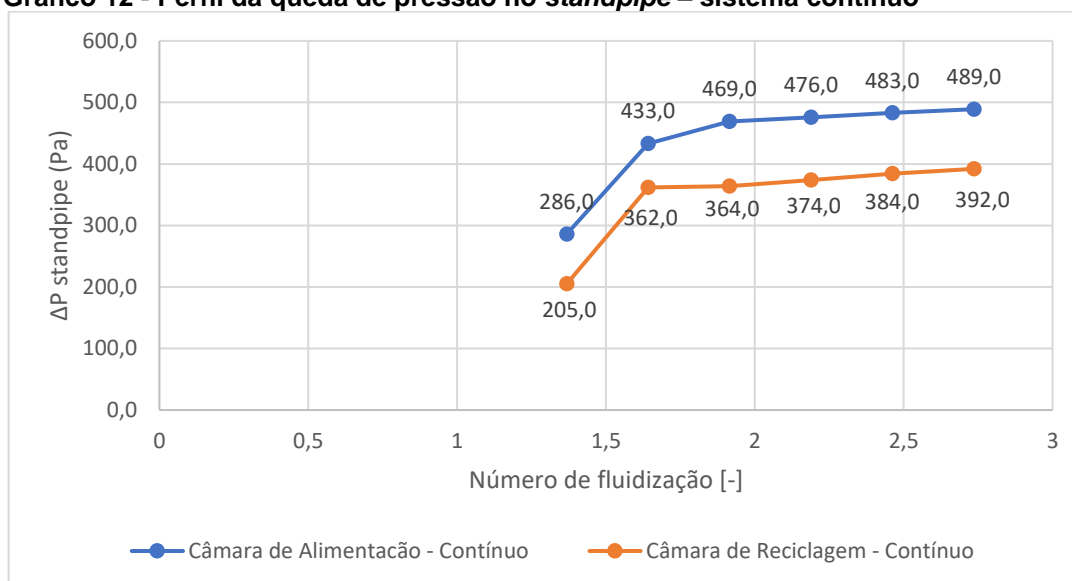
5.3 SISTEMA CONTÍNUO

Os Gráficos 11 a 13 mostram os perfis da queda de pressão *versus* o número de fluidização no *riser*, no *standpipe* e na válvula *loop-seal*, respectivamente, sem aplicação de ar pulsado, ou seja, em fluxo contínuo.

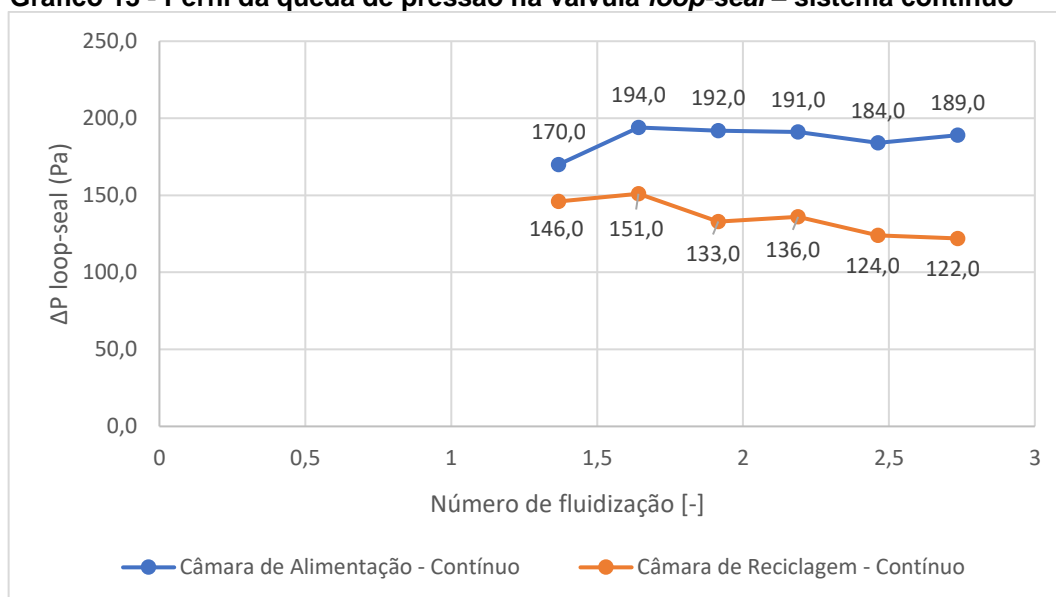
Gráfico 11 - Perfil da queda de pressão no *riser* – sistema contínuo



Fonte: autoria própria

Gráfico 12 - Perfil da queda de pressão no *standpipe* – sistema contínuo

Fonte: autoria própria

Gráfico 13 - Perfil da queda de pressão na válvula *loop-seal* – sistema contínuo

Fonte: autoria própria

Os gráficos 11, 12 e 13 mostram o comportamento e a influência da pulsação e do fluxo contínuo na queda de pressão para as três tomadas de pressão avaliadas, tanto para câmara de alimentação, como para a reciclagem.

Há uma grande diferença no sistema contínuo, observou-se nos itens 5.1 e 5.2 que para número de fluidização abaixo de 1 se tornava possível iniciar o processo, sem que se tivesse alcançado a velocidade de mínima fluidização. No sistema contínuo isto não é possível, tornando-se necessário um número de fluidização

superior a 1 para poder iniciar o processo, esta é uma grande desvantagem observada em relação aos sistemas pulsados.

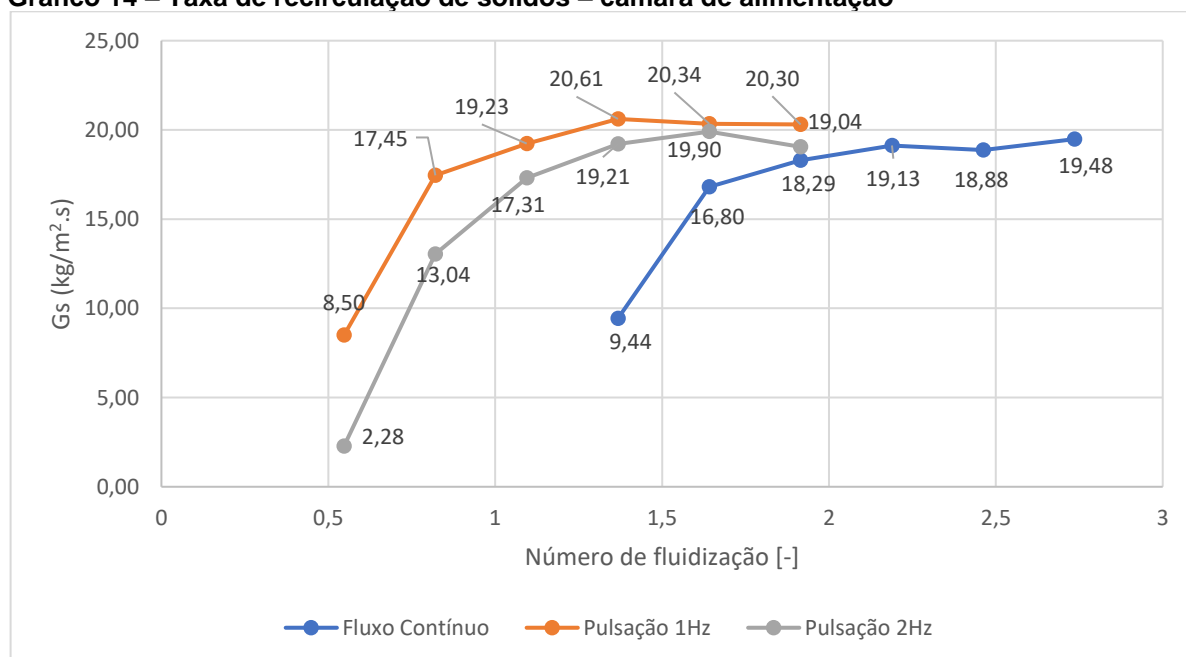
A pressão se manteve a valores altos para todos os sistemas, porém o fato de poder utilizar número de fluidização inferior a 1 é um grande avanço e oportunidade para investimento em pesquisas e possíveis ganhos.

Outra tendência observada é que nos Gráficos 5 a 10 com pulsação de 1 Hz e 2 Hz, o comportamento tanto no *riser*, *standpipe* e *loop-seal* é similar, diferindo somente para o sistema contínuo, Gráficos 11, 12 e 13 os quais destoam dos demais, comprovando assim a eficiência do sistema pulsado.

5.4 ANÁLISE DA CÂMARA DE ALIMENTAÇÃO

Para compreender o comportamento do fluido, torna-se necessário avaliar o comportamento dos sólidos no equipamento, para este fim avaliou-se a taxa de recirculação de sólidos em função do número de fluidização, como mostra o Gráfico 14.

Gráfico 14 – Taxa de recirculação de sólidos – câmara de alimentação

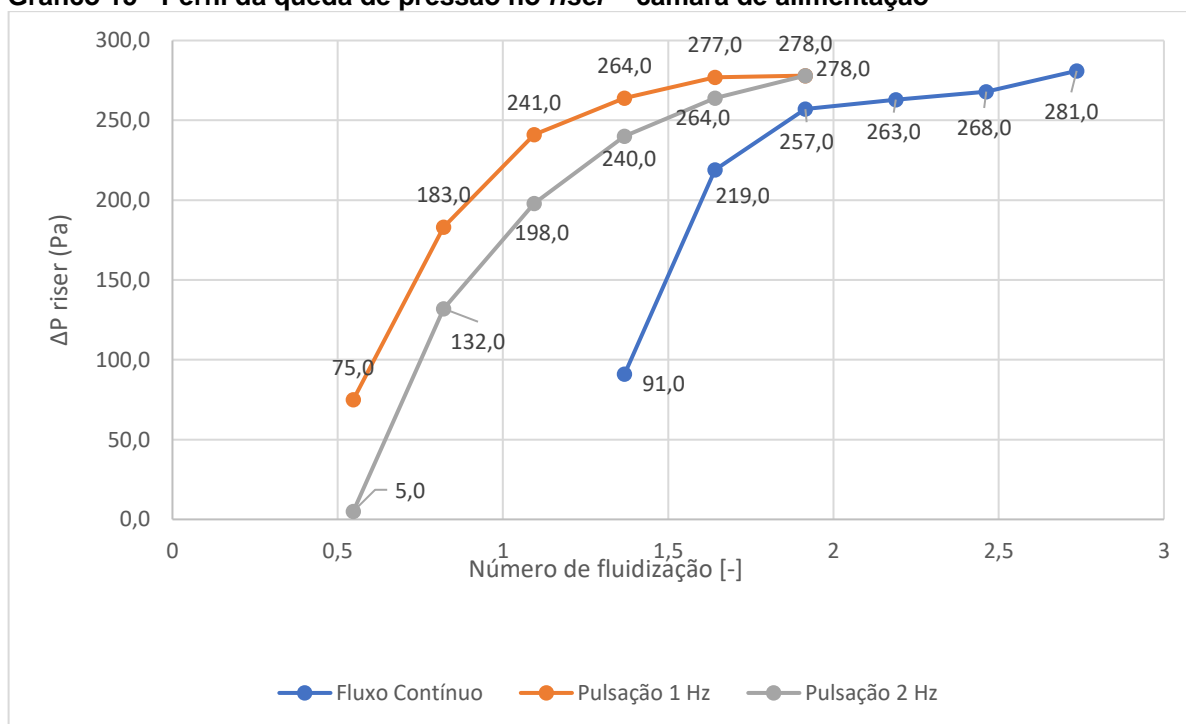


Fonte: autoria própria

Com os dados obtidos e analisando a taxa de recirculação dos sólidos em razão do número de fluidização do Gráfico 14, pode-se observar que para as situações em que se empregou pulsos de 1 Hz e 2 Hz na câmara de alimentação houve uma diminuição na vazão requerida em número de fluidização com relação ao sistema com fluxo contínuo. Apesar desta diminuição na vazão requerida no número de fluidização houve uma penalização para o sistema, sendo que a pressão para os sistemas pulsados é muito maior que no sistema contínuo, conforme pode ser observado no Gráfico 14.

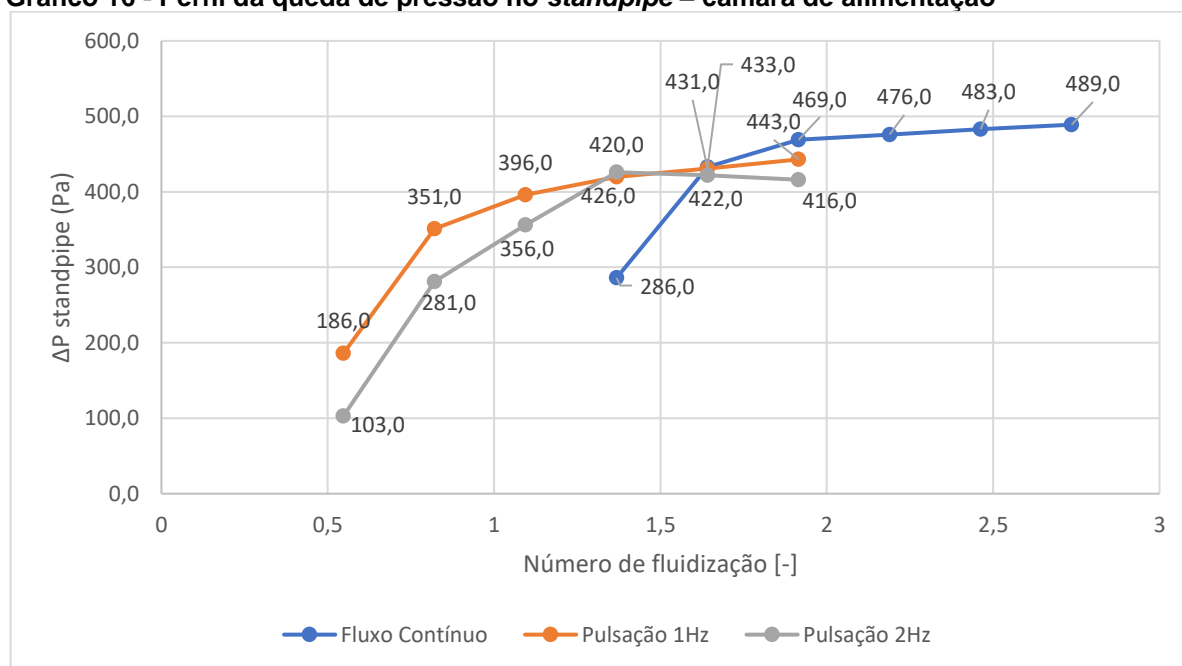
Os Gráficos 15, 16 e 17 mostram os perfis da queda de pressão versus o número de fluidização no *riser*, no *standpipe* e na válvula *loop-seal*, respectivamente, para a câmara de alimentação.

Gráfico 15 - Perfil da queda de pressão no *riser* – câmara de alimentação



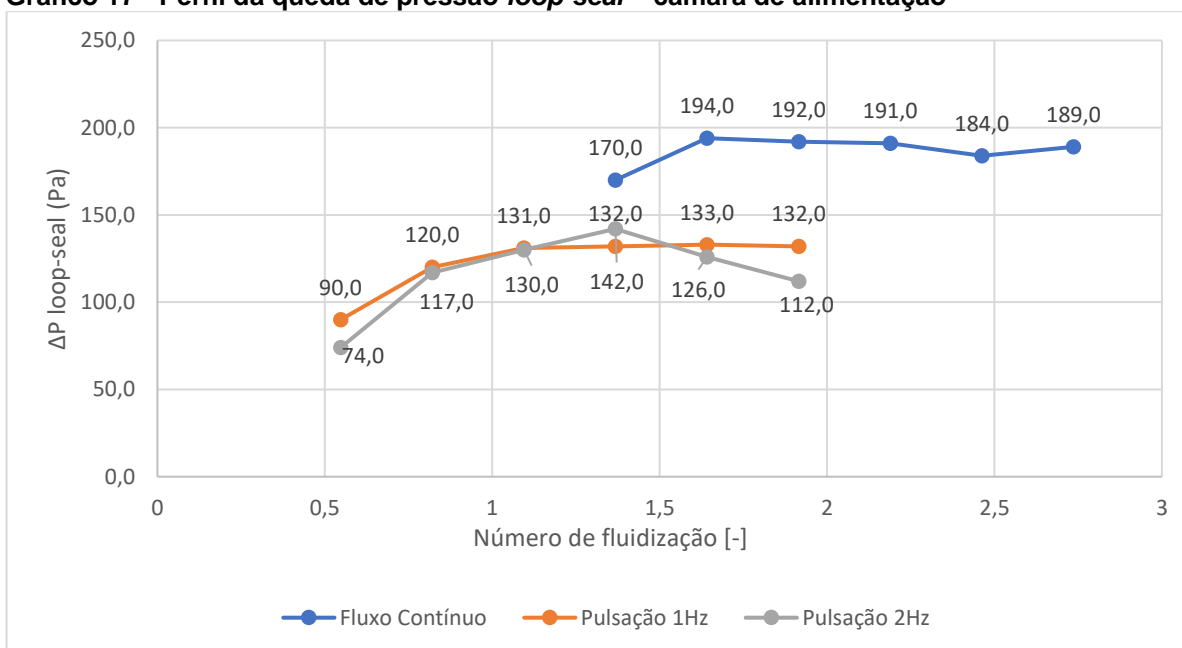
Fonte: autoria própria

Gráfico 16 - Perfil da queda de pressão no *standpipe* – câmara de alimentação



Fonte: autoria própria

Gráfico 17 - Perfil da queda de pressão *loop-seal* – câmara de alimentação



Fonte: autoria própria

Observa-se no Gráfico 15 com queda de pressão no *riser* de 100 Pa, com apenas 0,54 de número de fluidização e com frequências de 1 e 2 Hz de pulsação torna-se possível retirar o sistema do estado estacionário, sem que o mesmo tenha atingido a velocidade de mínima fluidização.

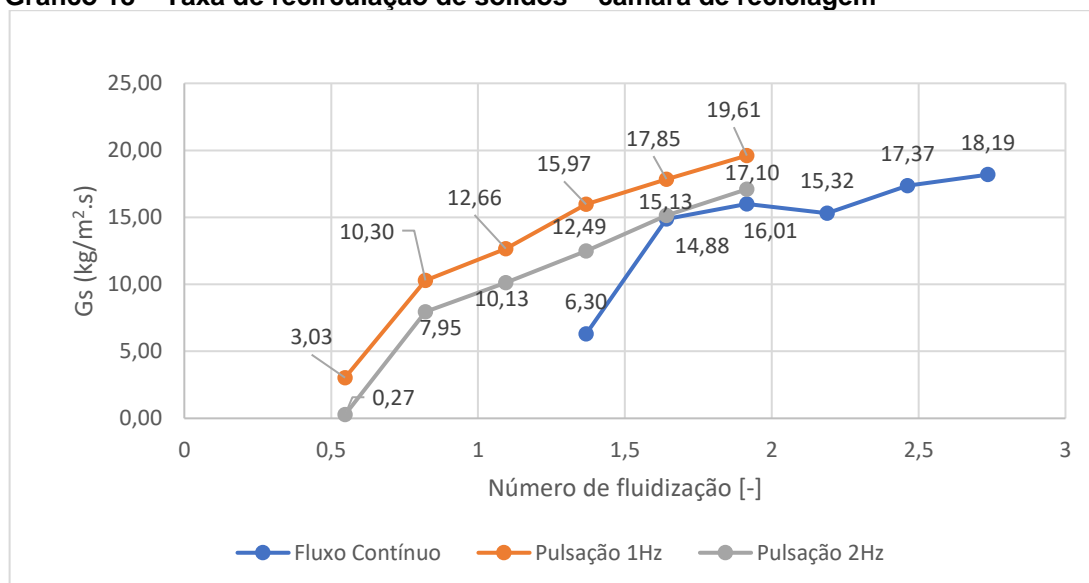
Para sistemas com fluxo contínuo como pode ser observado nos Gráficos 15, 16 e 17 é necessário número de fluidização mínimo de 1,36 para ocorrer a movimentação dentro do leito.

Outra constatação importante observada é que ao se trabalhar com aeração muito baixa em torno de 0,54 número de fluidização a influência nas variáveis de pressão é bastante grande, porém quando se aplica ar pulsado na alimentação a queda de pressão não é tão alta na câmara de alimentação devido a porosidade ser muito maior.

5.5 ANÁLISE DA CÂMARA DE RECICLAGEM

O Gráfico 18 mostra a taxa de recirculação de sólidos *versus* número de fluidização, para a câmara de reciclagem.

Gráfico 18 – Taxa de recirculação de sólidos – câmara de reciclagem

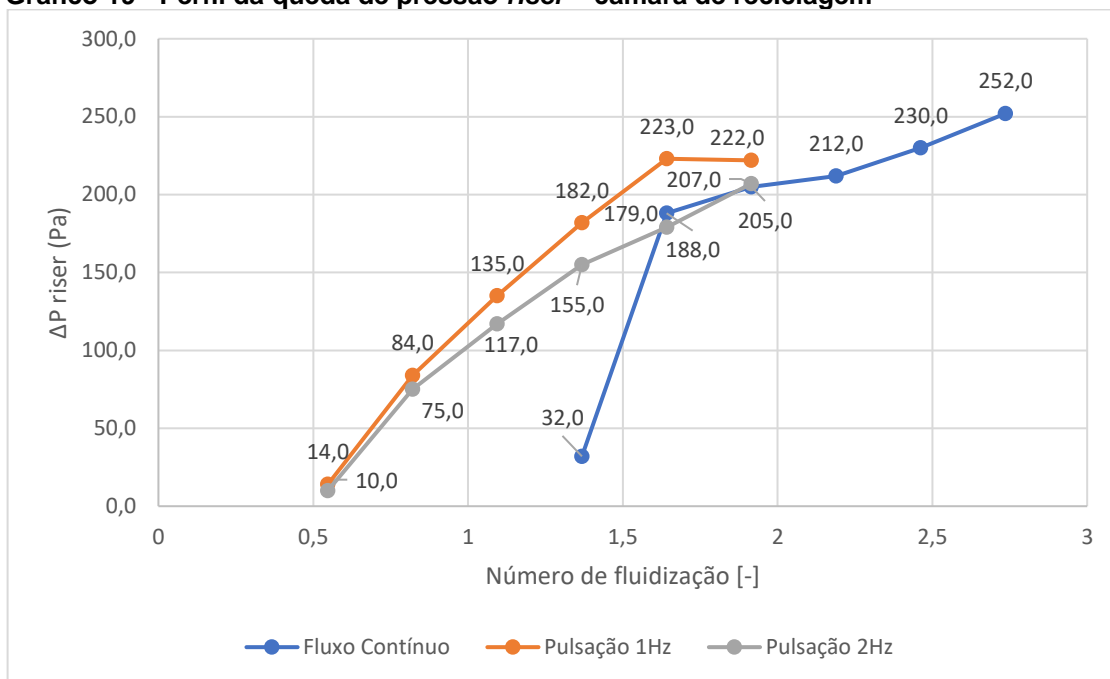


Fonte: autoria própria

Observa-se que o Gráfico 18 segue o mesmo padrão observado no Gráfico 14, para taxa de recirculação de sólidos na alimentação, comprovando assim que valores menores de número de fluidização utilizando ar pulsado já se torna possível obter resultados, atendendo-se claro para um aumento considerável na pressão.

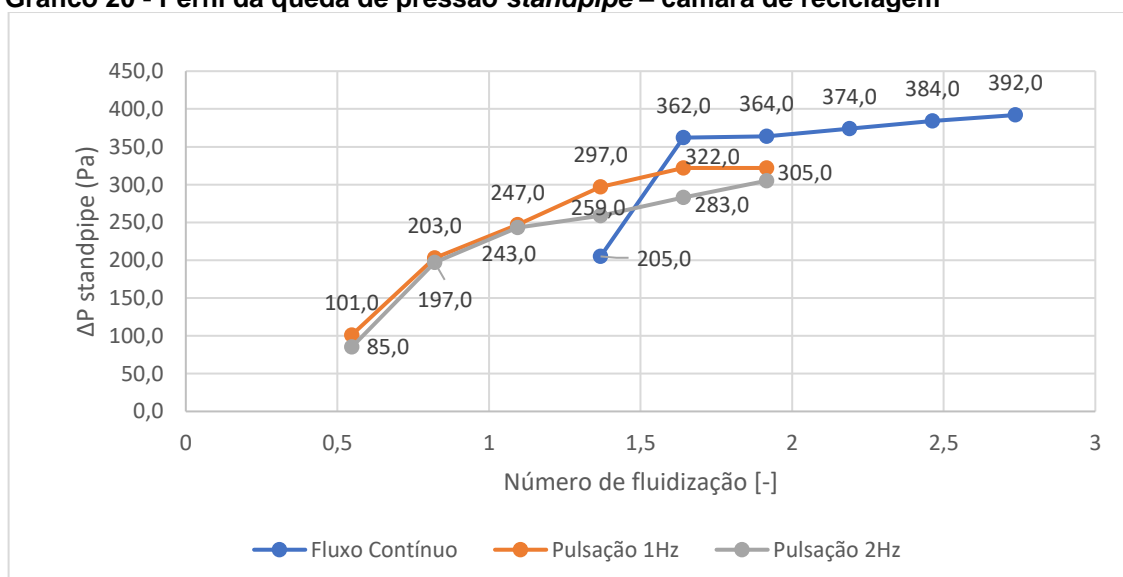
Os Gráficos 19, 20 e 21 mostram os perfis da queda de pressão versus o número de fluidização no *riser*, no *standpipe* e na válvula *loop-seal*, respectivamente, para a câmara de reciclagem.

Gráfico 19 - Perfil da queda de pressão *riser* – câmara de reciclagem

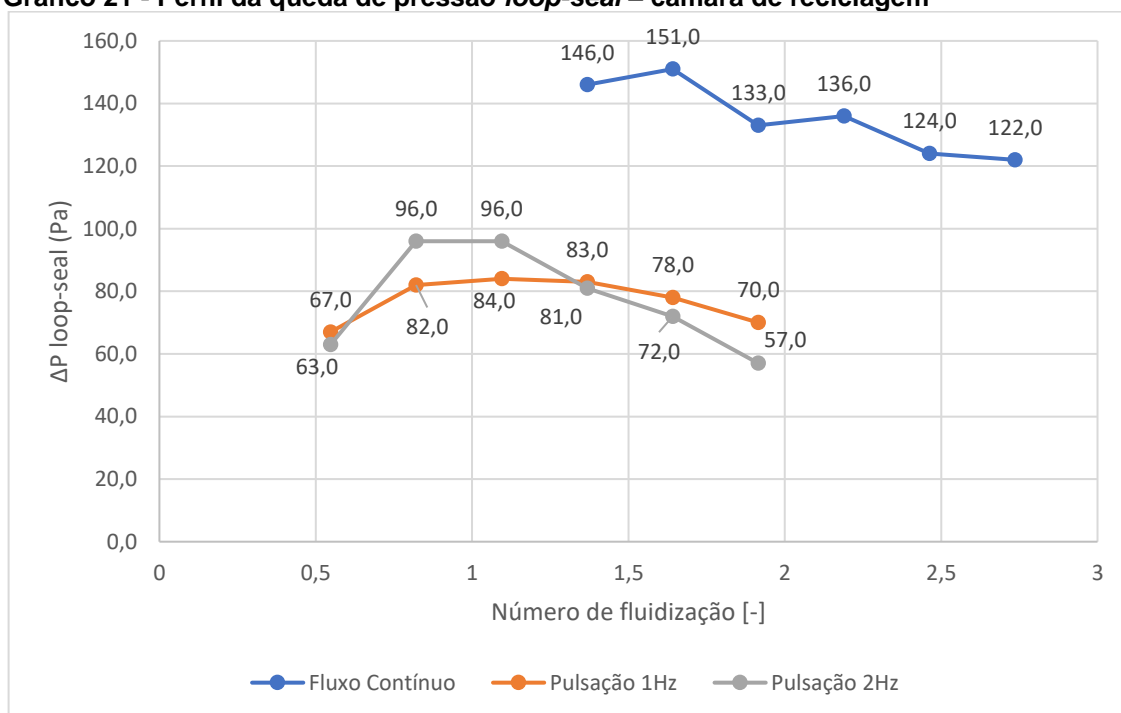


Fonte: autoria própria

Gráfico 20 - Perfil da queda de pressão *standpipe* – câmara de reciclagem



Fonte: autoria própria

Gráfico 21 - Perfil da queda de pressão *loop-seal* – câmara de reciclagem

Fonte: autoria própria

Constatou-se com os resultados obtidos nos Gráficos 19, 20 e 21 que há uma maior queda de pressão na câmara de reciclagem, isto se deve ao fato que a porosidade é mais dependente nesta situação, pois o leito é pequeno e se expande muito facilmente, proporcionando assim este aumento na porosidade.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou a realização de estudos para sistemas de leito fluidizado pulsante utilizando frequências de pulsação de 1 Hz e 2 Hz, realizando a comparação com o sistema contínuo para verificação das diferenças entre os sistemas.

Observou-se que para sistemas pulsantes pode-se trabalhar com valores muito baixos de aeração, sendo possível retirar o sistema do estado estacionário sem se ter alcançado a velocidade de mínima fluidização necessária.

Este trabalho mostrou e comprovou a importância da realização de novos estudos de leito fluidizado pulsante e da necessidade de investimentos em novas pesquisas sobre o tema.

Recomenda-se para trabalho futuros, a realização da diminuição do inventário de partículas para estudar seus efeitos sobre os resultados e utilização de partículas menores para verificar seus efeitos sobre o sistema pulsado.

REFERÊNCIAS

ALI Syed Sadiq, ASIF Mohammad. Fluidization of nano-powders: Effect of flow pulsation. **Powder Technology**, v 225, p 86-92, 2012.

BASU, Prabir. **Combustion and gasification in fluidized beds**. New York: Taylor e Francis, p. 21 - 437 2006.

BASU, P.; CHENG, L. apud BASU, 2006. An Analysis Of Loop Seal Operations In a Circulating Fluidized Bed. **Institut Of Chemical Engineers**, China, v. 78, p.991-999, out. 2000.

BIZHAEM, K. H.; TABRIZI B. H. Experimental study on hydrodynamic characteristics of gas–solid pulsed fluidized bed. **Powder Technology**, v. 237, p. 14-23, 2013.

GELDART, D.; BAEYENS J. The Design of Distributors for Gas-Fluidized Beds. **Powder Technology**, v. 42, p. 67-78, 1985

IRELAND, E., PITT, K., SMITH, R. A review of pulsed flow fluidisation; the effects of intermittent gas flow on fluidised gas–solid bed behaviour. **Powder Technology**, v. 292, p. 108-122, 2016.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. USA: Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p.

LI, Z., KOBAYASHI, N., NISHIMURA, A., DEGUCHI, S., HASATANI, M. Fluidization Characteristics in a Fluidized bed of Dissimilar Particles. **13th International Drying Symposium (IDS)**. Beijing, China, v. A, p. 587-595, 2002

PARISE, Maria R. Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido. 2007. **Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – UNICAMP**.

YANG, W. C. Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems. **Marcel Dekker**: New York, 2003.

ZHANG, D.; KOKSAL M. Heat transfer in a pulsed bubbling fluidized bed. **Powder Technology**, v. 168, p. 21-31, 2006.