

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MODO DE AERAÇÃO DE UMA
VÁLVULA *LOOP-SEAL* NA OPERAÇÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO
CIRCULANTE**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2019

FERNANDA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MODO DE AERAÇÃO DE UMA
VÁLVULA *LOOP-SEAL* NA OPERAÇÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO
CIRCULANTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne.

PONTA GROSSA

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.11/20

O48 Oliveira, Fernanda de

Estudo da influência do modo de aeração de uma válvula *loop-seal* na
operação de um leito fluidizado circulante. / Fernanda de Oliveira, 2019.

91 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Ponta Grossa, 2019.

1. Válvulas. 2. Fluidização. 3. Escoamento multifásico. 4. Engenharia
mecânica. I. Behainne, Jhon Jairo Ramirez. II. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. III. Título.

CDD 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 33/2019

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MODO DE AERAÇÃO DE UMA VÁLVULA LOOP-SEAL NA OPERAÇÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

por

Fernanda de Oliveira

Esta dissertação foi apresentada às **09 horas** de **12 de setembro de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Térmica e Fluidos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo
(Departamento de Energia-UNICAMP)

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
(DAMEC-UTFPR) – Orientador

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
(DAMEC-UTFPR)



Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
Coordenador do PPGEM
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

- A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa –

RESUMO

OLIVEIRA, Fernanda de. **Estudo da influência do modo de aeração de uma válvula *loop-seal* na operação de um leito fluidizado circulante**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

A caracterização da fluidodinâmica no interior de sistemas de leito fluidizado circulante (LFC), seja para a melhoria no rendimento dos processos atuais, ou para o desenvolvimento de novas aplicações, tem sido objeto de estudo de pesquisadores. Em especial, esforços têm sido dedicados ao estudo dos dispositivos de reciclagem dos sólidos utilizados nestes sistemas, devido à sua forte influência sobre a intensidade do trânsito das partículas e na distribuição do inventário do leito ao longo do circuito de fluidização. Assim, tendo em vista a necessidade de aprofundar o conhecimento operacional destes dispositivos, analisou-se no presente estudo o efeito promovido pelo modo de aeração de uma válvula *loop-seal* do tipo U sobre o comportamento de variáveis operacionais de uma unidade de LFC. Para isso, testes experimentais na temperatura ambiente foram realizados em um equipamento de LFC construído em escala de laboratório, utilizando aeração vertical nos modos mono e bicâmara na base da válvula de reciclagem dos sólidos. Fixando-se a velocidade de fluidização no *riser* e o tamanho médio das partículas do leito (areia quartzosa), verificou-se a influência dos modos de aeração acima escritos sobre o perfil de pressão estática, a distribuição do inventário de leito e a taxa de circulação dos sólidos transportados pelo circuito de fluidização em função do modo e da taxa de injeção de ar aplicada nas câmaras de alimentação e de reciclagem da válvula *loop-seal*. O tratamento dos dados incluiu uma análise de variância (ANOVA), a fim de verificar a significância dos efeitos ocasionados pelos modos de aeração utilizados na válvula *loop-seal* nas condições experimentais testadas. Sob operação nos diferentes modos de aeração analisados, os resultados indicaram taxas crescentes de circulação dos sólidos na faixa de 15 kg/m².s a 46 kg/m².s, quando o número de fluidização na válvula *loop-seal* variou de 1,4 a 2,5. Observou-se que o modo de aeração não afetou o valor médio do G_S ao nível de confiança de 95%. No entanto, foram identificadas diferenças significativas na queda de pressão nos componentes *riser*, *standpipe*/câmara de alimentação e câmara de reciclagem em relação ao modo de aeração usado. Nesse sentido, com o aumento da taxa de aeração, os dois primeiros componentes acima descritos experimentaram um aumento na queda de pressão, enquanto que, no terceiro, houve uma diminuição devido ao acréscimo na porosidade do leito no local. O ciclone não sofreu variação significativa na queda de pressão em qualquer modo e taxa de aeração, sugerindo a não dependência deste em relação à taxa de circulação de sólidos promovida no sistema de LFC.

Palavras-chave: Válvula *loop-seal*. Câmara de aeração. Leito fluidizado circulante. Escoamento gás-sólido. ANOVA.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Fernanda de. **Influence study of the aeration mode of a loop-seal valve on the operation of a circulating fluidized bed.** 2019. 91 p. Thesis (Master's Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology – Parana, Ponta Grossa, 2019.

The study of the hydrodynamics behavior inside CFB units either to improve the performance of current processes or to develop new applications still deserves the attention of researchers. In particular, efforts have been devoted to the study of solids recycling devices because of their strong influence on the intensity of the particle circulation, the pressure drop and the distribution of the bed inventory along the fluidization loop. The present study aimed to analyze the effect promoted by the aeration mode of an U-type loop-seal valve on the hydrodynamics behavior of a CFB system. For this, experimental runs under room temperature conditions were performed in a bench-scale CFB unit using vertical chamber aeration in mono and dual modes at the base of the solids recycling valve. By keeping constant both the superficial fluidization velocity at the riser and the bed mass loaded with particles of quartz sand, the study analyzes the influence of the aeration modes applied on the loop-seal valve on the static pressure profile, the bed inventory distribution and the solids circulation rate as a function of the air injection rate used in the supply and/or the recycle chamber. An analysis of variance (ANOVA) is also included in order to verify the significance of the effects caused by the aeration modes used in the loop-seal valve under the experimental conditions tested. Under operation in the different aeration modes analyzed, the results indicated increasing solids flow rates in the range of 15 kg/m².s to 46 kg/m².s, when the fluidization number in the loop-seal valve ranged from 1.4 to 2.5. It was observed that the aeration mode did not affect the mean G_s value at the 95% confidence level. However, significant differences were observed in the pressure drop in the riser, standpipe/supply chamber and recycle chamber components compared to the aeration mode used. In this sense, with the increase of the aeration rate, the first two components described above experienced an increase in the pressure drop, while in the third one there was a decrease due to the increase in the porosity of the bed in the place. The cyclone did not undergo significant variation in the pressure drop in any mode and aeration rate, suggesting the non-dependence of this in relation to the rate of solids circulation promoted in the LFC system.

Keywords: Loop-seal valve. Aeration chamber. Circulating fluidized bed. Gas-solid flow. ANOVA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regimes de fluidização em sistemas gás-sólido e líquido-sólido.....	20
Figura 2 - Regimes de fluidização em função da velocidade relativa gás-partícula ..	21
Figura 3 - Diagrama com a classificação de partículas fluidizadas por gás	26
Figura 4 - Fronteiras dos regimes de fluidização.....	27
Figura 5 - Distribuição da porosidade de sólidos em diferentes regimes de fluidização	28
Figura 6 - Movimento interno dos sólidos no <i>riser</i> de um leito fluidizado circulante ..	29
Figura 7 - Configuração típica de um leito fluidizado circulante	30
Figura 8 - Efeito da velocidade superficial do gás e do fluxo de circulação dos sólidos na fração de gás no <i>riser</i>	31
Figura 9 - Efeito do inventário de sólidos sobre a fração de gás ao longo do <i>riser</i> ...	32
Figura 10 - Estrutura núcleo-anular de um LFC	32
Figura 11 - Perfil de pressão característico de um sistema de LFC com válvula <i>loop-seal</i>	33
Figura 12 - Válvulas não mecânicas	35
Figura 13 - Movimento dos sólidos através de uma válvula <i>loop-seal</i>	36
Figura 14 - Circuito de fluidização	40
Figura 15 -Localização das tomadas de pressão na região da válvula <i>loop-seal</i>	41
Figura 16 - Amostrador de sólidos	48
Figura 17 - Fluxograma com as etapas principais para execução dos testes na UFRAF	53

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Vista geral da UFRAF	39
Fotografia 2 - Painel de manômetros do tipo “U” para indicação das leituras de pressão no circuito de fluidização	42
Fotografia 3 - Parte superior do <i>riser</i> e ciclone.....	43
Fotografia 4 - Válvula <i>loop-seal</i> da UFRAF	44
Fotografia 5 - Soprador, <i>by-pass</i> , válvula globo e sensor de temperatura PT-100 ...	45
Fotografia 6 - Medidor de vazão de ar tipo placa de orifício.....	46
Fotografia 7 - Conjunto de tubulação acoplado na parte inferior do <i>riser</i>	46
Fotografia 8 - Distribuidor de ar tipo <i>Tuyere</i> alojado no topo do <i>plenum</i>	47
Fotografia 9 - Reguladores de pressão e rotômetros do mecanismo de aeração	48
Fotografia 10 - Amostrador de sólidos instalado na UFRAF	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comportamento da taxa de circulação de sólidos em relação ao período de amostragem e taxa de aeração.....	56
Gráfico 2 - Comparação da taxa de circulação de sólidos em função do modo de aeração	57
Gráfico 3 - Comportamento do G_S projetado em função da taxa e do modo de aeração	60
Gráfico 4 - Valores médios de G_S em função do modo de aeração.....	62
Gráfico 5 - Comportamento do perfil de pressão estática no LFC em função da taxa de aeração	63
Gráfico 6 - Comportamento do perfil de pressão estática no LFC em função do modo de aeração	65
Gráfico 7 - Comportamento da queda de pressão no <i>riser</i> em relação à taxa e modo de aeração	67
Gráfico 8 - Valores médios da queda de pressão no <i>riser</i> em função do modo de aeração	68
Gráfico 9 - Comportamento da queda de pressão no ciclone em relação à taxa e modo de aeração	69
Gráfico 10 - Valores médios da queda de pressão no ciclone em função do modo de aeração	70
Gráfico 11 - Comportamento da queda de pressão no <i>standpipe</i> e câmara de alimentação da <i>loop-seal</i> em relação à taxa e modo de aeração	71
Gráfico 12 - Valores médios da queda de pressão no <i>standpipe</i> e câmara de alimentação da <i>loop-seal</i> em função do modo de aeração	73
Gráfico 13 - Comportamento da queda de pressão na câmara de reciclagem da <i>loop-seal</i> em relação à taxa e modo de aeração	74
Gráfico 14 - Valores médios da queda de pressão na câmara de reciclagem da <i>loop-seal</i> em função do modo de aeração	75
Gráfico 15 - Comportamento do inventário remanescente de sólidos no <i>riser</i> em relação à taxa e modo de aeração	76
Gráfico 16 - Comportamento do inventário remanescente de sólidos no <i>standpipe</i> e na câmara de alimentação em relação à taxa e modo de aeração	77
Gráfico 17 - Valores médios do inventário de sólidos remanescente no <i>riser</i> em função do modo de aeração.....	78
Gráfico 18 - Valores médios do inventário de sólidos remanescente no <i>standpipe</i> e <i>loop-seal</i> em função do modo de aeração	78
Gráfico 19 - Relação entre G_S e a queda de pressão nos componentes do sistema de LFC	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Planejamento experimental.....	52
Tabela 2 - Análise de variância do G_S em função do modo de aeração.....	89
Tabela 3 - Análise de variância da queda de pressão no <i>riser</i> em função do modo de aeração.....	89
Tabela 4 - Análise de variância da queda de pressão ciclone em função do modo de aeração.....	90
Tabela 5 - Análise de variância da queda de pressão <i>standpipe</i> e <i>câmara de alimentação em</i> função do modo de aeração.....	90
Tabela 6 - Análise de variância da queda de pressão <i>loop-seal em</i> função do modo de aeração.....	90
Tabela 7 - Análise de variância do inventário de sólidos remanescente no <i>riser em</i> função do modo de aeração.....	91
Tabela 8 - Análise de variância do inventário de sólidos remanescente no <i>standpipe</i> e <i>loop-seal</i> em função do modo de aeração.....	91

LISTA DE SIGLAS

LFB	Leito Fluidizado Borbulhante
LFC	Leito Fluidizado Circulante
RFR	Regime de Fluidização Rápida
UFRAF	Unidade de Fluidização Rápida à Frio
BL-1	Módulo 1 <i>riser</i> construído em aço carbono
BL-2	Módulo 2 <i>riser</i> construído em acrílico
BL-3	Módulo 3 <i>riser</i> construído em aço carbono
BL-4	Módulo 4 <i>riser</i> construído em acrílico
BL-5	Módulo 5 <i>riser</i> construído em aço carbono
BL-6	Módulo 6 <i>riser</i> construído em acrílico
BL-7	Módulo 7 <i>riser</i> construído em aço carbono
BL-8	Módulo 8 <i>standpipe</i> construído em aço carbono
BL-9	Módulo 9 <i>standpipe</i> construído em acrílico
BL-10	Módulo 10 <i>standpipe</i> construído em aço carbono

LISTA DE SÍMBOLOS

d_{cir}	Diâmetro circunscrito	[μm]
d_i	Diâmetro médio de abertura das peneiras sucessivas	[μm]
d_{ins}	Diâmetro inscrito	[μm]
d_p	Diâmetro da partícula;	[μm]
d_s	Diâmetro com base na superfície específica	[μm]
d_{sv}	Diâmetro de <i>Sauter</i>	[μm]
d_v	Diâmetro com base no volume	[μm]
G_S	Taxa de circulação de sólidos	[$\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$]
H_{SP}	Altura de sólidos no <i>stanpipe</i>	[m]
M_P	Massa da partícula	[kg]
M_r	Massa de sólidos na região de <i>riser</i>	[kg]
I_t	Inventário total de sólidos	[kg]
M_{sl}	Massa de sólidos na região de <i>standpipe</i> e <i>loop-seal</i>	[kg]
P_{LS-AS}	Tomada de pressão na saída da câmara de alimentação	[Pa]
P_{LS-RS}	Tomada de pressão na saída da câmara de reciclagem	[Pa]
P_{RS-1}	Tomada de pressão 1 no <i>riser</i>	[Pa]
P_{RS-2}	Tomada de pressão 2 no <i>riser</i>	[Pa]
P_{RS-3}	Tomada de pressão 3 no <i>riser</i>	[Pa]
P_{RS-4}	Tomada de pressão 4 no <i>riser</i>	[Pa]
P_{SP-1}	Tomada de pressão <i>stanpipe</i>	[Pa]
Q_a	Taxa de aeração	[SL/min]
Q_{af}	Taxa de aeração na câmara de alimentação	[SL/min]
Q_{ar}	Taxa de aeração na câmara de reciclagem	[SL/min]
u	Velocidade superficial de fluidização	[m/s]
u_{als}	Velocidade de aeração na válvula <i>loop-seal</i>	[m/s]
u_c	Velocidade de fluidização no pico de flutuação de pressão	[m/s]
u_k	Velocidade de fluidização na amplitude de flutuação pressão constante	[m/s]
u_{mb}	Velocidade de mínimo borbulhamento	[m/s]
u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
u_{ms}	Velocidade de mínimo <i>slugging</i>	[m/s]
u_t	Velocidade terminal das partículas	[m/s]

u_{tr}	Velocidade de transporte das partículas	[m/s]
S_p	Área superficial da partícula	[m ²]
V_p	Volume da partícula	[m ³]
V_{total}	Volume total do leito	[m ³]
x_i	Fração de massa retida entre duas peneiras sucessivas	[-]

LETRAS GREGAS

ϕ	Esfericidade da partícula	[-]
ε	Porosidade do leito	[-]
ε_s	Fração de sólidos	[-]
ρ_{real}	Densidade real	[kg/m ³]
$\rho_{aparente}$	Densidade aparente	[kg/m ³]
ρ_g	Densidade do gás	[kg/m ³]
ρ_s	Densidade dos sólidos	[kg/m ³]
μ	Viscosidade dinâmica do ar.	[Pa.s]
ΔP_{SP}	Queda de pressão no <i>standpipe</i>	[Pa]
ΔP_{1-2}	Queda de pressão no <i>riser</i>	[Pa]
ΔP_{2-3}	Queda de pressão no ciclone	[Pa]
$\Delta P_{4,5-3}$	Queda de pressão no <i>standpipe</i>	[Pa]
$\Delta P_{4,5-6}$	Queda de pressão no <i>loop-seal</i>	[Pa]
ΔP_{6-1}	Queda de pressão no tubo de reciclagem	[Pa]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1 FLUIDIZAÇÃO	19
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS PARA SISTEMAS DE FLUIDIZAÇÃO.....	23
2.2.1 Tamanho das Partículas	23
2.2.2 Esfericidade das Partículas.....	24
2.2.3 Densidade das Partículas	25
2.3 REGIME DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA	26
2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE	29
2.5 VÁLVULA <i>LOOP-SEAL</i>	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL	39
3.1.1 Circuito de Fluidização.....	40
3.1.2 Subsistema Fornecedor do Ar de Fluidização	44
3.1.3 Subsistema de Aeração da Válvula de Recirculação.....	47
3.2 INSTALAÇÃO DO AMOSTRADOR DE SÓLIDOS	48
3.3 MATERIAL DO LEITO E CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS	49
3.4 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	51
3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 EFEITO DO TEMPO DE AMOSTRAGEM NA TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS	55
4.2 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NA TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS (G_s).....	59
4.3 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NO PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA AXIAL.....	63
4.4 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NA QUEDA DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DO LFC	66
4.5 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DO INVENTÁRIO DE SÓLIDOS.....	75
4.6 RELAÇÃO ENTRE TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS E QUEDA DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DO LFC	79

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A - ANOVA.....	88

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de leito fluidizado circulante (LFC) são dispositivos de escoamento multifásico em que sólidos depositados no interior de uma coluna vertical, integrante de um circuito de tubulação, são arrastados parcialmente pela ação de um fluido que os atravessa a alta velocidade, colocando-os em movimento com múltiplas passagens. Esta operação acontece no regime fluidodinâmico conhecido como fluidização rápida, no qual a velocidade superficial do fluido em contato com os sólidos da coluna supera a velocidade terminal das partículas do leito (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Devido às vantagens proporcionadas na transferência de calor e de massa, os sistemas de LFC têm sido aplicados com sucesso em processos termoquímicos (combustão e gaseificação) para a produção de energia térmica/elétrica, em processos petroquímicos (craqueamento catalítico), no processamento mineral (calcinação de alumina, pré-calcinação para fabricação de cimento, etc), e na indústria química e farmacêutica (ftálico anidro para naftaleno, decomposição de sulfato, cloro), dentre outros (BASU, 2006).

Embora o circuito de fluidização dos sistemas de LFC do tipo gás-sólido possua configurações particulares de acordo com a aplicação específica, quatro componentes estão sempre presentes: coluna principal ou *riser*, separador de partículas, coluna secundária ou *standpipe* e válvula de reciclagem de sólidos. No *riser* costumam acontecer os principais fenômenos de transformação das partículas do leito. No separador de partículas, geralmente um ciclone, ocorre a retenção dos sólidos da corrente de gás. O *standpipe* canaliza estas partículas retidas até a válvula de reciclagem, que tem a função de retornar o leito para o *riser* (RAMIREZ-BEHAINNE, 2007).

A válvula de reciclagem ou de recirculação de sólidos, foco do presente projeto de dissertação, constitui um dos componentes mais importantes do sistema de LFC, uma vez que ela garante a estabilidade operacional do circuito de fluidização, controlando a taxa de retorno das partículas ao ponto de evitar o esgotamento delas no *riser* ou no *standpipe*. Estas válvulas de reciclagem podem ser mecânicas ou não mecânicas. Vários tipos de válvulas não mecânicas são utilizados no controle de fluxo de sólidos, sendo as principais: válvula L, válvula J, *seal-pot* e *loop-seal* (BARESCHINO *et al.*, 2014). As válvulas não mecânicas são preferidas na maioria

das aplicações, sendo de menor custo e de fácil fabricação, bem como, mais apropriadas para uso em altas temperaturas (VALASZEK; BEHAINNE, 2012).

Na operação das válvulas de reciclagem não mecânicas, costuma-se utilizar ar comprimido (aeração) para realizar o controle da taxa de recirculação dos sólidos. No caso especial das válvulas *loop-seal*, essa aeração pode ser aplicada de diversas maneiras, seja em pontos localizados na lateral ou na base. Quando o ar é injetado exclusivamente na base, podem ser usados dois modos de aeração, um deles incluindo o fornecimento de gás em ambas as câmaras de passagem de sólidos (denominadas câmara de alimentação e câmara de reciclagem) e, o outro, a adição de gás em apenas uma delas. Trabalhos da literatura sugerem indiretamente que, dependendo da escolha do modo de aeração na base, o sistema de LFC responde de forma particular para manter a condição de estabilidade operacional, trazendo consequências ou efeitos sobre parâmetros fluidodinâmicos do escoamento gás-sólido. No entanto, verifica-se que em nenhum desses estudos analisa-se em detalhe tal influência.

Em vista dessa lacuna, o presente trabalho visa aprofundar o entendimento dos efeitos promovidos pela escolha do modo de aeração de uma válvula *loop-seal*, propondo a realização de testes experimentais em condições ambientais que permitam analisar o seu impacto sobre um sistema de LFC instalado em escala de laboratório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho de dissertação tem como objetivo geral avaliar experimentalmente o comportamento operacional de um sistema de leito fluidizado circulante (LFC) sob diferentes modos de aeração de uma válvula de reciclagem de sólidos *loop-seal* do tipo U.

1.1.2 Objetivos Específicos

Constituem os objetivos específicos deste projeto:

- Propor e instalar um amostrador de sólidos na região do *standpipe* do sistema de LFC atualmente disponível em laboratório, com o propósito de obter dados experimentais da taxa externa de circulação das partículas em função dos modos de aeração utilizados na *loop-seal*;
- Realizar testes experimentais no sistema de LFC, a fim de determinar os efeitos produzidos pelos modos de aeração monocâmara e bicâmara na válvula *loop-seal* sobre o comportamento do perfil de pressão estática, a perda de pressão nos principais componentes, a distribuição do inventário de sólidos e a taxa de circulação dos sólidos no sistema de fluidização. A análise da influência do modo de aeração será estudada em função das câmaras arejadas e da taxa de aeração fornecida na válvula de recirculação.
- Comparar os resultados obtidos neste estudo com os reportados em trabalhos da literatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

Válvulas do *tipo loop-seal* para processos em sistemas de leito fluidizado circulante apresentam vantagens importantes, dentre as quais se destacam: facilidade de uso em diferentes escalas de tamanho, construção simples, controle eficiente da taxa de circulação e alta confiabilidade operacional advinda da sua menor tendência para formar aglomerados, como consequência da fluidização turbulenta promovida na câmara de reciclagem (BASU, 2006; VALASZEK; BEHAINNE, 2012).

Embora trabalhos realizados ao longo de várias décadas tenham já estudado extensivamente os parâmetros operacionais que afetam a fluidodinâmica dos leitos fluidizados circulantes, como os apresentados por Rhodes *et al.* (1988), Thober (1995), Kim *et al.* (2002) e Li *et al.* (2017), a literatura não apresenta trabalhos detalhando os efeitos diretos ocasionados pelo modo de aeração das válvulas *loop-seal*, apesar do uso maciço destes dispositivos de controle em unidades comerciais e em escala piloto. Os poucos estudos prévios relacionados ao tema sugerem que as

condições operacionais impostas nas câmaras de alimentação e de reciclagem em uma válvula *loop-seal* podem alterar as características do escoamento gás-sólido dos sistemas de LFC.

Portanto, há necessidade de aprofundar a compreensão do escoamento multifásico no interior destes sistemas acoplados a válvulas *loop-seal*, principalmente visando o melhoramento no rendimento dos processos atuais e/ou a viabilidade de novas aplicações.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando e justificando o tema de estudo, bem como descrevendo os objetivos almejados da pesquisa. O Capítulo 2 mostra uma breve revisão da literatura referente a aspectos teóricos de fluidização, regimes de fluidização, caracterização das partículas, fluidização rápida, sistemas de LFC e detalhes relacionados à operação da válvula *loop-seal*.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada, envolvendo a descrição do equipamento experimental, o material do leito e a sua caracterização, o planejamento e o procedimento dos ensaios realizados.

No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos testes experimentais, sendo estes também discutidos e comparados com os reportados em trabalhos da literatura.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas a conclusão e as sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, apresentam-se alguns fundamentos teóricos e estudos da literatura referentes às características do fenômeno da fluidização e da fluidodinâmica dos sistemas de LFC. Além disso, abordam-se aspectos operacionais das válvulas de reciclagem do tipo *loop-seal* e a sua relação com o comportamento dos sistemas de LFC acoplados a estes dispositivos, quando funcionando sob diferentes condições de aeração.

2.1 FLUIDIZAÇÃO

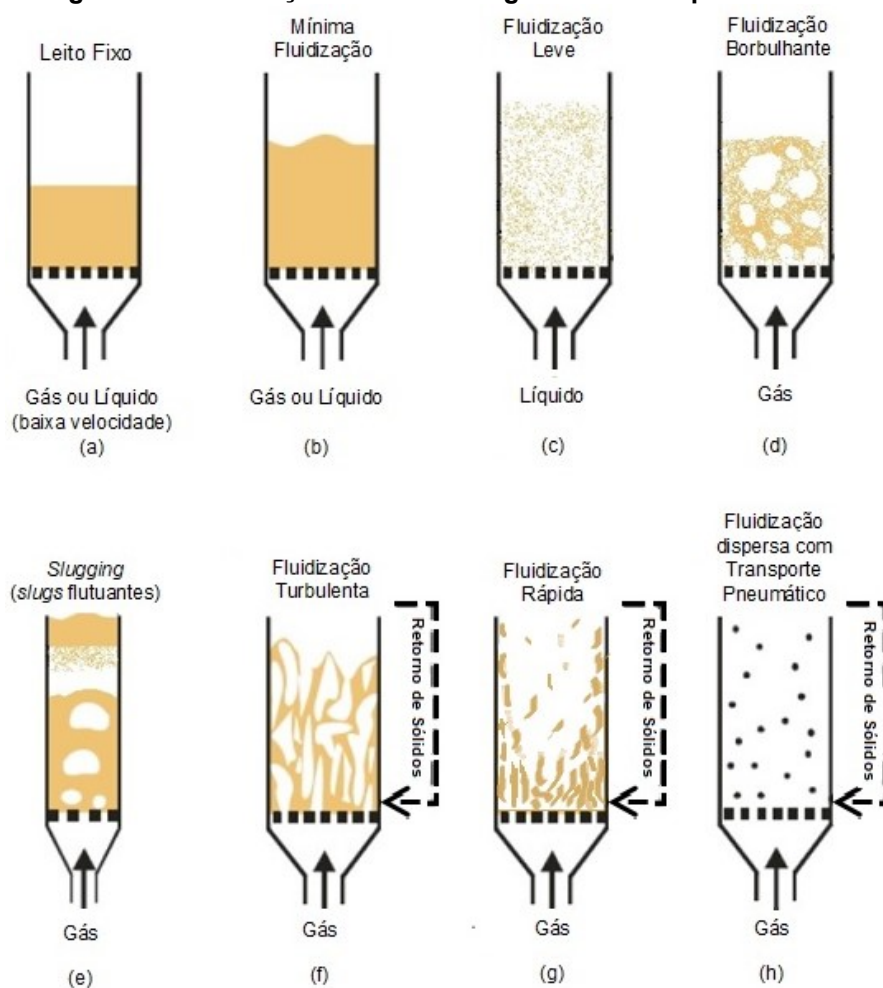
A fluidização é uma operação em que um leito de partículas sólidas adquire o comportamento análogo ao de um fluido, quando suspenso pela ação de um gás ou de um líquido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). De acordo com Basu (2006), este fenômeno foi observado pela primeira vez em 1921, na Alemanha, quando Fritz Winkler notou que sólidos carbonáceos contidos dentro de um recipiente se comportavam como um fluido ao introduzir produtos gasosos que atravessavam o leito de partículas em sentido ascendente.

Conforme relatado por Kunii e Levenspiel (1991), a fluidização traz vantagens em muitos processos no qual ela tem aplicação. Por exemplo, na área de conversão energética, onde é amplamente empregada, a fluidização proporciona as seguintes vantagens:

- Boa mistura dos sólidos, induzindo a condições isotérmicas no leito, resposta lenta a mudanças bruscas na operação, como alteração repentina de temperatura, proporcionando maior margem de segurança para reações exotérmicas.
- Remoção ou adição de calor em grandes reatores com a circulação de sólidos entre dois leitos fluidizados.
- Utilização em operações de grande escala.
- Elevadas taxas de transferência de calor e massa entre o gás de fluidização e as partículas reagentes.
- Alta taxa de transferência de calor entre o leito fluidizado e os objetos imersos no leito ou expostos na superfície da coluna de fluidização.

A Figura 1, apresentada por Kunii e Levenspiel (1991), mostra os diferentes regimes de fluidização que pode adquirir um leito de partículas sólidas em contato com um fluido injetado na base da coluna e em velocidade crescente, desde o caso (a) até o caso (h).

Figura 1 - Regimes de fluidização em sistemas gás-sólido e líquido-sólido



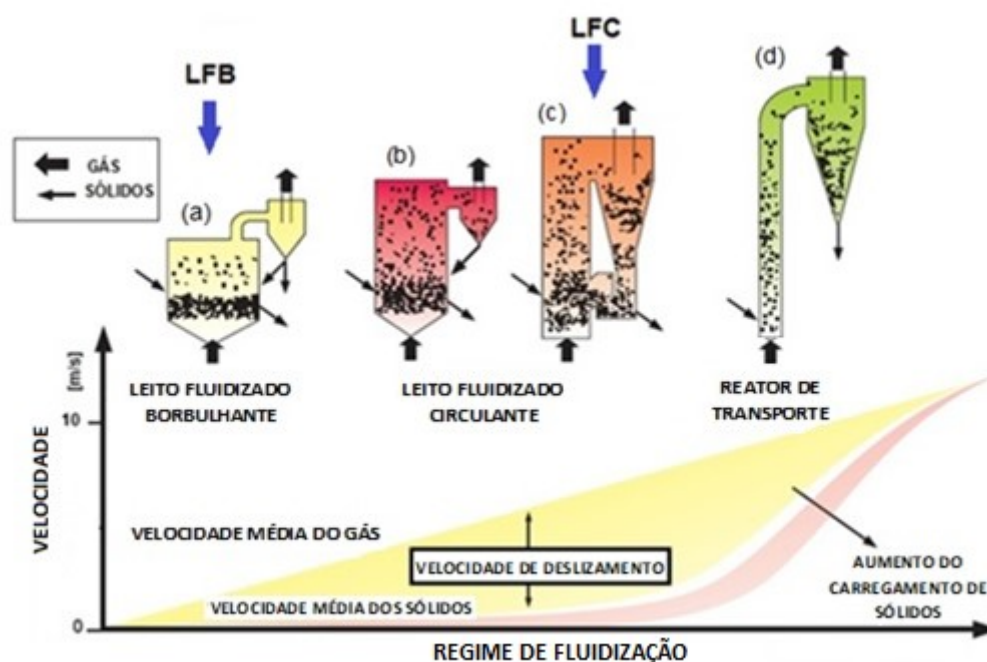
Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

O comportamento fluidodinâmico do leito e os diferentes regimes de fluidização criados pela interação fluido-partícula, apresentadas na Figura 1, dependem das características físicas de cada fase, bem como das condições operacionais do sistema (CREMASCO, 2012). Para o material particulado, tornam-se relevantes a distribuição granulométrica, o tamanho médio de partículas, a forma e a massa específica ou densidade real. No que se refere ao agente fluidizante, interessam, principalmente, a viscosidade dinâmica e a massa específica.

Para o caso do escoamento gás-sólido, a Figura 2 identifica, em função da velocidade de deslizamento ou velocidade relativa gás-partícula, os regimes de

fluidização lenta ou de leito borbulhante (LFB) e de fluidização rápida ou de leito circulante (LFC), bem como o regime de transporte pneumático. Na fluidização borbulhante (Figura 2(a)), o leito se mantém agitado pela formação de bolhas de gás, com arraste insignificante de partículas para fora da coluna de fluidização. Neste regime, a diferença entre a velocidade do gás e a dos sólidos (velocidade de deslizamento ou relativa gás-partícula) se mantém em valores baixos. Já, na fluidização rápida, que caracteriza o regime fluidodinâmico dos sistemas de LFC intermitentes e contínuos (Figura 2(b) e 2(c), respectivamente), a velocidade do gás cresce rapidamente em relação à velocidade dos sólidos, atingindo-se o valor máximo da velocidade de deslizamento. A velocidade de deslizamento volta a diminuir gradativamente ao incrementar ainda mais a velocidade do gás, até atingir-se o regime de transporte pneumático, uma vez que os sólidos arrastados pelo gás são fortemente acelerados, alcançando velocidade final similar à do fluido (Figura 2(d)).

Figura 2 - Regimes de fluidização em função da velocidade relativa gás-partícula



Fonte: Adaptado de Basu (2006).

Diferentemente do que acontece na fluidização lenta ou borbulhante, leitos fluidizados submetidos a elevadas velocidades do gás apresentam divisão pouco aparente entre a região densa no fundo da coluna e a região diluída no topo, exibindo uma região de transição relativamente longa entre as duas regiões (PÉCORA, 1995).

A transição entre os diferentes regimes de fluidização tem relação com o comportamento da amplitude da flutuação de pressão estática do escoamento gás-sólido. Basu (2006) estabelece que, por exemplo, na transição do regime de fluidização borbulhante para o de regime turbulento, a flutuação de pressão sofre primeiro um aumento gradativo devido ao crescimento das bolhas de gás, atingindo um valor máximo de amplitude em certa velocidade de fluidização. Com o posterior aumento da velocidade do fluido, apresenta-se uma diminuição nas oscilações da pressão, até esta alcançar um valor constante na velocidade de fluidização correspondente ao início do regime de fluidização turbulenta, com as bolhas dando lugar a uma emulsão sólido-gás com arraste de sólidos. No Quadro 1, resume-se as condições de transição dos regimes de fluidização e as características dos mesmos em função da velocidade do gás, apresentada por Yang (2003).

Quadro 1 - Descrição das transições entre regimes de fluidização

Velocidade	Regime de Fluidização	Características do Regime
$0 \leq u < u_{mf}$	Leito fixo	Partículas não suspensas; gás flui através dos espaços intersticiais dos sólidos
$u_{mf} < u < u_{mb}$	Mínima fluidização	O leito se expande de forma suave e homogênea, com pequena movimentação; superfície do leito bem definida
$u_{mb} \leq u < u_{ms}$	Regime borbulhante	Bolhas de gás formadas acima do distribuidor; bolhas de gás promovem a mistura de sólidos até se quebrar na superfície
$u_{ms} \leq u < u_c$	Regime <i>slugging</i>	Bolhas se formam do tamanho do diâmetro da seção da coluna; a superfície do leito cresce com regular frequência, assim como a flutuação da pressão.
$u_c \leq u < u_k$	Transição para o regime turbulento	A flutuação da pressão diminui gradualmente até ficar constante no regime turbulento
$u_k \leq u < u_{tr}$	Regime turbulento	A superfície do leito é difusa e dificilmente distinguível; formação de <i>clusters</i>
$u > u_{tr}$	Regime de fluidização rápida	Partículas são transportadas para fora do leito e necessitam ser recicladas; região densa na parte inferior e uma fase diluída no topo do <i>riser</i> ; não existe uma superfície de leito
$u \gg u_{tr}$	Transporte pneumático	Todas as partículas são transportadas em uma fase diluída com concentração variando ao longo da altura da coluna

u - velocidade superficial de fluidização; u_c - velocidade de fluidização no pico de flutuação de pressão; u_k - velocidade de fluidização na amplitude de flutuação de pressão constante; u_{mb} - velocidade de mínimo borbulhamento; u_{mf} - velocidade de mínima fluidização; u_{ms} - velocidade de mínimo *slugging*; u_{tr} - velocidade de transporte das partículas.

Fonte: Adaptado de Yang (2003).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS PARA SISTEMAS DE FLUIDIZAÇÃO

A caracterização de partículas sólidas se faz necessária em todas as aplicações que envolvem sistemas de fluidização, ajudando a garantir uma operação eficiente dos processos (THOBER, 1995). Essa caracterização envolve parâmetros intrinsecamente estáticos (tamanho, densidade e forma), bem como o seu comportamento dinâmico em relação ao fluxo do fluido (coeficiente de arrasto e velocidade terminal) (YANG, 2003).

2.2.1 Tamanho das Partículas

O tamanho representativo das partículas utilizadas em sistemas de fluidização pode ser determinado a partir de técnicas que envolvem, principalmente, o peneiramento em malhas padronizadas, microscopia óptica e eletrônica, ou difração a laser.

O peneiramento é um dos métodos mais conhecidos e comuns, por ser simples, reproduzível e econômico para classificar e determinar os tamanhos das partículas. É um dos poucos procedimentos que fornece uma distribuição de tamanho de partícula baseada na massa de sólidos medida em cada intervalo de tamanho.

A operação de peneiramento é realizada utilizando malhas com tamanho de abertura padronizada (ASTM, Tyler e outras). O método consiste em empilhar as peneiras em uma ordem crescente de tamanho de abertura de malha, colocando o material em análise na peneira superior e fazendo-as vibrar por um tempo fixo. Ao final do ensaio, mede-se a fração de massa retida entre peneiras sucessivas.

O diâmetro médio das partículas, determinado através das técnicas citadas anteriormente, pode ser expresso em diferentes bases ou referências, dependendo da aplicação ou do processo desenvolvido na fluidização. No entanto, na maioria dos casos, costuma-se utilizar o diâmetro médio de *Sauter*, também conhecido como diâmetro de superfície-volume (d_{SV}). De acordo com Yang (2003), este diâmetro é definido como o diâmetro de uma esfera tendo a mesma proporção de área superficial externa para volume da partícula, sendo expresso por:

$$d_{SV} = \frac{6V_p}{S_p} = \frac{d_V^3}{d_S^2} \quad (1)$$

Na Equação 1, d_V e d_S representam os diâmetros com base em volume e em superfície específica, definidos respectivamente pelas Equações (2) e (3):

$$d_V = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$d_S = \left(\frac{S_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Onde V_p é o volume da partícula e S_p é a área superficial externa dela.

Segundo Howard (1989), o diâmetro médio de *Sauter* pode ser calculado a partir do método de peneiramento, aplicando a Equação 4:

$$d_{SV} = \left[\sum \left(\frac{x_i}{d_i} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

onde:

x_i - fração de massa retida entre duas peneiras sucessivas;

d_i - diâmetro médio de abertura das peneiras sucessivas;

2.2.2 Esfericidade das Partículas

Normalmente, as partículas utilizadas em sistema de LFC possuem formas irregulares, ou seja, não são completamente esféricas. Essa irregularidade de forma pode ser medida pela esfericidade. A esfericidade (ϕ) foi definida por Wadell em 1933, sendo esta calculada como a relação entre a superfície de uma esfera que apresenta o mesmo volume de uma dada partícula e a superfície real dessa partícula (YANG, 2003). Matematicamente, a esfericidade é expressa por:

$$\phi = \left(\frac{d_V}{d_S} \right)^2 = \left(\frac{d_{SV}}{d_V} \right) \quad (5)$$

Peçanha e Massarani (1986) propuseram uma relação para a determinação da esfericidade, sendo esta obtida pela razão entre os diâmetros inscrito (d_{ins}) e circunscrito (d_{cir}) que podem ser encontrados no entorno de uma partícula:

$$\phi = \frac{d_{ins}}{d_{cir}} \quad (6)$$

2.2.3 Densidade das Partículas

O termo densidade de partícula costuma ser empregado no estudo de sistemas particulados e na área da fluidização, uma vez que os sólidos envolvidos geralmente apresentam porosidade interna e externa. No caso particular da desconsideração dos poros do sólido, define-se a densidade real (ρ_{real}) ou massa específica:

$$\rho_{real} = \frac{M_p}{V_p} \quad (7)$$

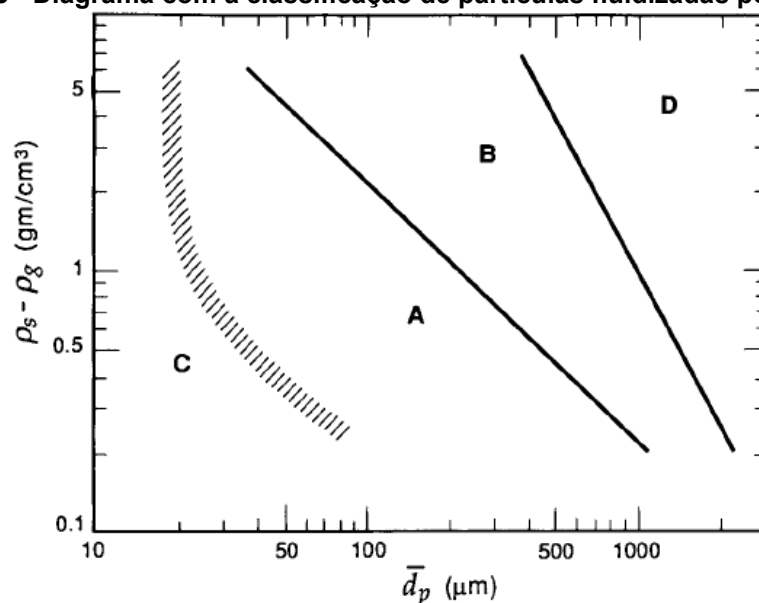
Onde M_p representa a massa da partícula e V_p é o volume da mesma na ausência de poros.

Já, ao considerar a presença dos poros na partícula, pode-se calcular a densidade aparente ($\rho_{aparente}$) como sendo a massa da partícula dividida pelo seu volume total (V_{total}), incluindo neste, o volume ocupado pelos poros externos e internos do sólido:

$$\rho_{aparente} = \frac{M_p}{V_{total}} \quad (8)$$

O tamanho médio de partícula e as densidades do sólido e do gás foram relacionados por Geldart (1973) para classificar partículas em grupos com comportamento fluidodinâmico similar (KUNII; LEVENSPIEL, 1991). De acordo com essa classificação, amplamente utilizada na área de sistemas particulados, as partículas podem ser classificadas em quatro grupos: A, B, C e D, ocupando as regiões ilustradas na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama com a classificação de partículas fluidizadas por gás



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

O Grupo A representa as partículas denominadas aeráveis, de excelente fluidização. Com estas, o leito se expande consideravelmente durante a passagem do gás, apresentando velocidade de mínimo borbulhamento superior à velocidade de mínima fluidização.

Os sólidos do Grupo B, ou partículas *sand-like*, apresentam boa fluidização, porém, com as bolhas de gás surgindo no mesmo momento em que a velocidade de mínima fluidização é atingida. Com o aumento da velocidade intersticial do gás, ocorre o rápido crescimento das bolhas.

As partículas do Grupo C, que são finas e coesivas, mostram difícil fluidização. Elas formam canais preferenciais pela presença de forças interpartículas mais fortes que as de arraste exercidas pelo gás de fluidização.

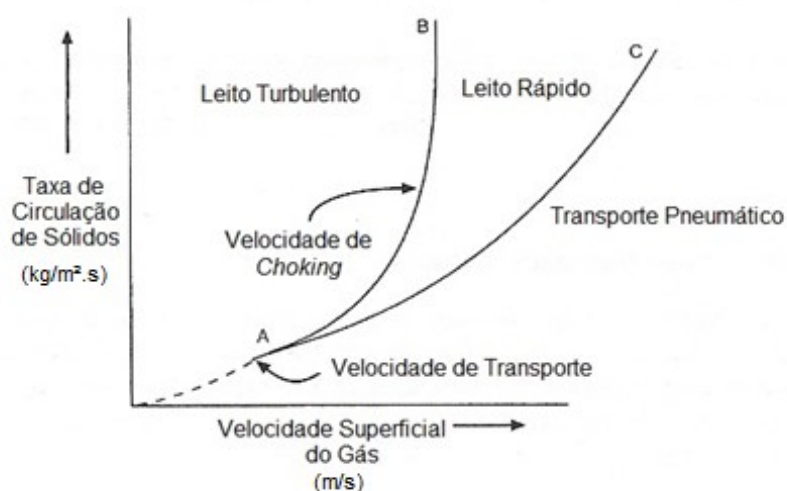
Finalmente, as partículas do Grupo D, caracterizam-se pelo seu grande diâmetro, normalmente acima de 600 μm . São também partículas de difícil fluidização, necessitando de altas velocidades do gás e levando a um leito de comportamento irregular, grandes formações de bolhas e canalização de partículas.

2.3 REGIME DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA

Os sistemas de LFC normalmente operam no regime de fluidização rápida, termo introduzido em 1976 por Yerushalmi. De acordo com Basu (2006), a região que

define o regime de fluidização rápida localiza-se entre a região do regime de leito turbulento e a condição de transporte pneumático (Figura 4), quando a velocidade do gás alcança pelo menos o valor da velocidade de transporte das partículas (u_{tr}). Nesse regime fluidodinâmico, haverá um carregamento parcial de sólidos para fora da coluna de fluidização, que deverá retornar a ela para manter a condição de estabilidade operacional. A linha que marca a fronteira entre os regimes turbulento e rápido corresponde às velocidades de colapso do leito (ou *choking*), no qual o valor da queda de pressão entre dois pontos verticais da coluna *riser* sofre uma mudança súbita.

Figura 4 - Fronteiras dos regimes de fluidização



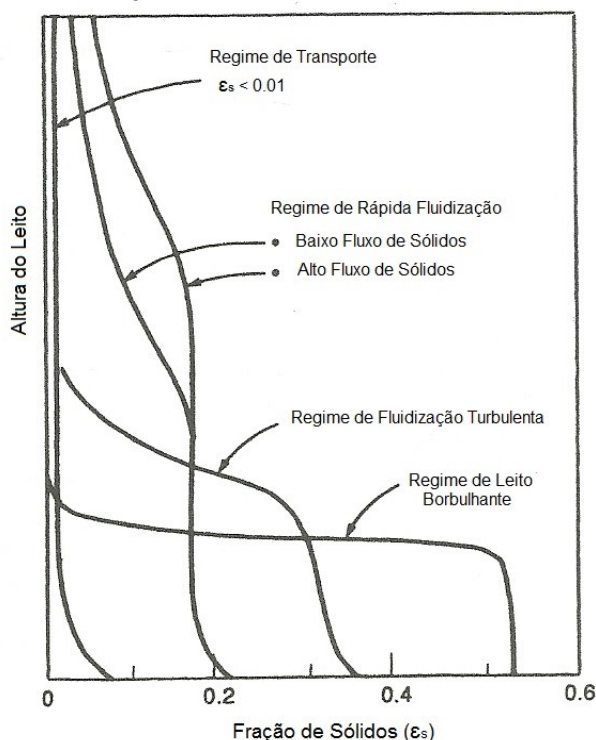
Fonte: Adaptado de Basu (2006).

Para os Grupos A e C de Geldart, o arraste no regime de fluidização rápida somente ocorrerá quando a velocidade do gás for várias vezes maior que a velocidade terminal. Já, para partículas dos Grupos B e D de Geldart, o arraste acontecerá já numa velocidade próxima da velocidade terminal das partículas (THOBER, 1995).

Com as altas velocidades do gás do regime de fluidização rápida, o leito passa a ocupar todo o volume da coluna de fluidização, sendo possível identificar uma diminuição gradativa na densidade da suspensão gás-sólido ao longo da extensão vertical do recipiente (THOBER, 1995). As propriedades das partículas interferem na forma do perfil axial de densidade do leito, com partículas finas possuindo decaimento gradativo, e partículas grossas e pesadas possuindo decaimento brusco (PÉCORA, 1995).

Sobre uma ampla gama de condições operacionais dos regimes de fluidização, as quais acarretam em diferentes comportamentos das partículas no leito fluidizado, Kunii e Levenspiel (1991), mostraram a distribuição da fração volumétrica de sólidos (ϵ_s) em relação à altura da coluna principal em diferentes regimes de fluidização (Figura 5). A porosidade do leito (ϵ) é definida como a fração de fase gasosa presente no escoamento gás-sólido, sendo equivalente ao valor $1-(\epsilon_s)$.

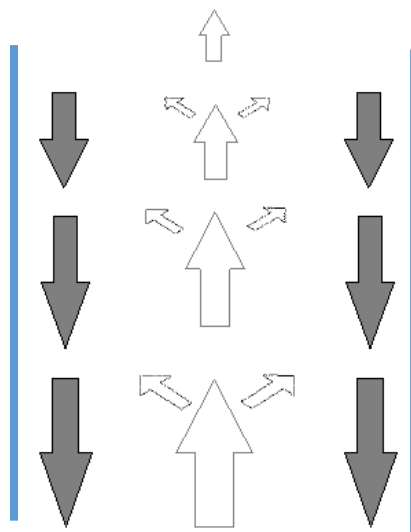
Figura 5 - Distribuição da porosidade de sólidos em diferentes regimes de fluidização



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

A concentração de sólidos pode variar não só com a distância axial ao longo da coluna de fluidização, mas também na direção radial. O movimento dos sólidos acontece em duas regiões dentro do recipiente, sendo uma delas central e a outra anular, próxima das paredes da coluna. Na região central, os sólidos se movimentam principalmente em direção ascendente, com uma parcela se espalhando radialmente para formar aglomerados ou *clusters* junto às paredes. Na região anular, estes aglomerados tendem a retornar para a base da coluna com velocidade relativamente baixa e com partículas dirigindo-se novamente ao centro da coluna, devido à desintegração dos aglomerados pela corrente gasosa (Figura 6).

Figura 6 - Movimento interno dos sólidos no riser de um leito fluidizado circulante



Fonte: Adaptado de Rhodes et al. (1988).

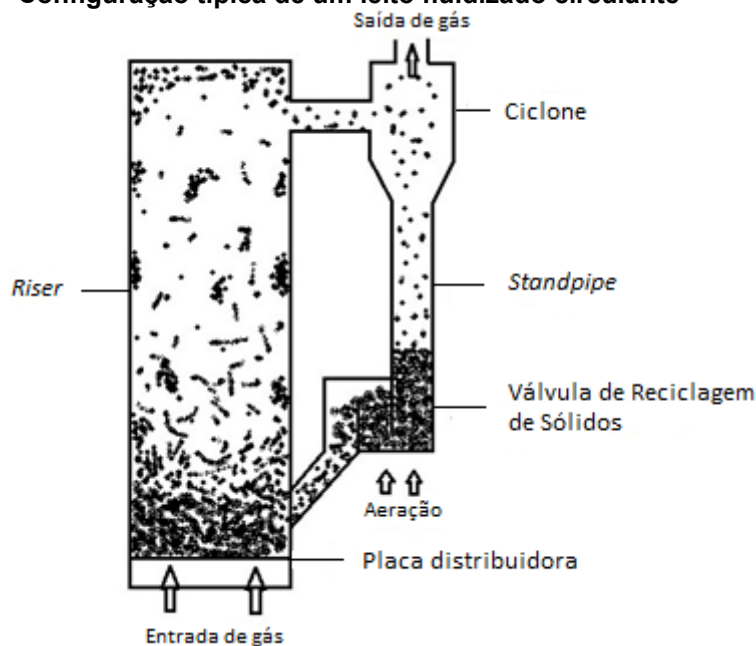
A circulação interna dos sólidos na coluna de fluidização é acentuada na região inferior do leito, sendo pequena ou quase nula na parte superior da coluna (THOBER, 1995).

2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

O sistema de LFC foi concebido em 1938 nos Estados Unidos, como alternativa para o desenvolvimento do processo de craqueamento catalítico utilizado na indústria do petróleo (BASU, 2006). O seu uso comercial na área de energia térmica/elétrica iniciou apenas em 1982, com a primeira caldeira de LFC sendo operada na Alemanha para atender uma planta de potência com capacidade de 84 MW, queimando carvão pulverizado com adição de calcário (MORITA, 2009).

Segundo Yang (2003) e Basu (2006), em um sistema de LFC com configuração típica, as partículas são arrastadas ao longo de um circuito de tubulação que apresenta a configuração da Figura 7.

Figura 7 - Configuração típica de um leito fluidizado circulante



Fonte: Adaptado de Yang (2003).

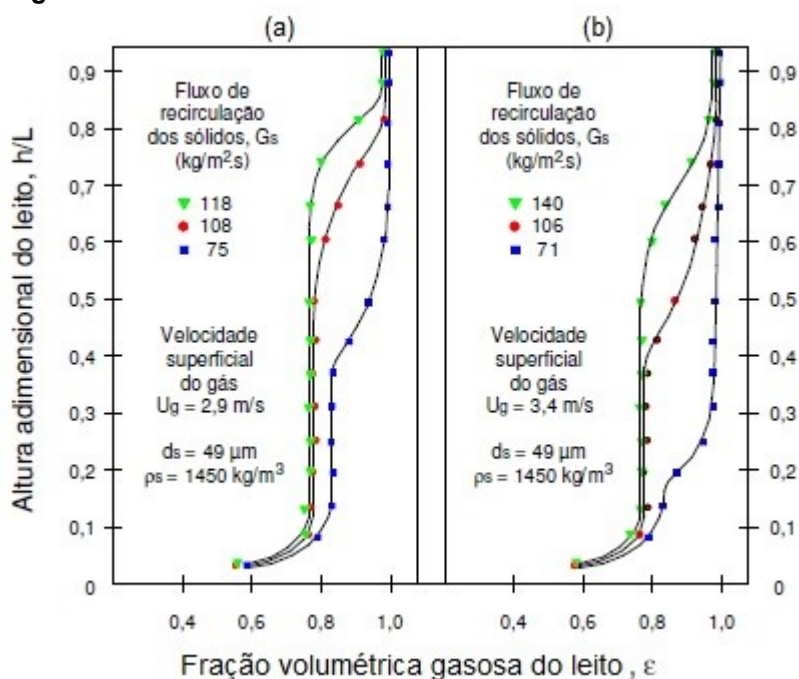
O gás superficial é injetado no fundo do *riser* em alta velocidade. A distribuição homogênea de ar é feita geralmente com o emprego de uma placa distribuidora, que também retém os sólidos na parte inferior do *riser*. Com a alta velocidade do gás, as partículas são transportadas ao topo do *riser* e são coletadas por um sistema de separação gás-sólido (geralmente um ciclone). As partículas são depositadas em uma coluna vertical, conhecida como *standpipe*. Na parte inferior do *standpipe*, as partículas retornam ao fundo do *riser* com o auxílio de uma válvula de reciclagem. As partículas atravessam este circuito muitas vezes, acompanhadas de uma porção de gás.

De acordo com Yang (2003), o comportamento fluidodinâmico que garante a operação estável de um sistema de LFC depende de vários fatores operacionais, dentre os quais estão: a velocidade superficial do gás fluidizante (2 m/s a 12 m/s), a taxa de circulação de sólidos (G_s), que costuma ficar na faixa de 10 kg/m².s a 1000 kg/m².s, o diâmetro médio das partículas do leito (50 μ m a 500 μ m), sendo frequentemente utilizadas partículas do grupo B de Geldart.

Weinstein *et al.* (1983), mostraram que, ao longo do *riser*, surge um ponto de inflexão que marca a transição do leito denso para o leito diluído, com a localização

deste mudando de acordo com variáveis operacionais. Com o aumento da taxa de circulação de sólidos, por exemplo, o ponto de inflexão é deslocado para cima, aumentando a fase densa no leito (Figura 8(a)), e conseqüentemente, diminui-se a região com maior porosidade (leito diluído). Já, incrementando a velocidade para um mesmo inventário de partículas, tem-se o deslocamento do ponto de inflexão para uma altura inferior no *riser*, ou seja, diminui-se o tamanho da região densa e, conseqüentemente, aumenta-se a região com maior porosidade de leito ou fração volumétrica de gás (Figura 8(b)).

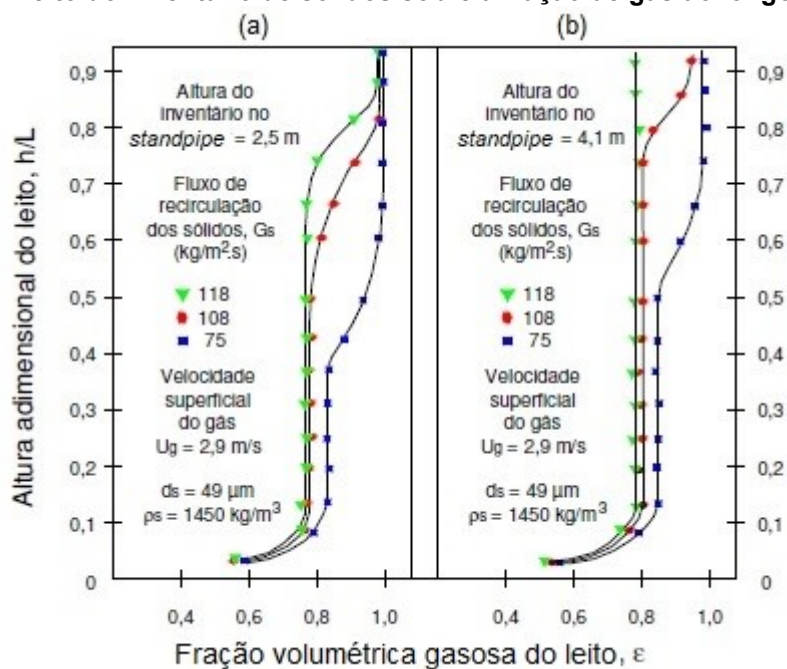
Figura 8 - Efeito da velocidade superficial do gás e do fluxo de circulação dos sólidos na fração de gás no *riser*



Fonte: Adaptado de Weinstein *et al.* (1983) e Ramirez - Behainne (2007).

Além da taxa de circulação de sólidos e da velocidade do gás, o aumento do inventário de sólidos no sistema desloca o ponto de inflexão para cima, gerando uma região mais densa no *riser* (Figura 9(a) e (b)). Uma análise deste fenômeno envolvendo todo o circuito de fluidização sugere que o ponto de inflexão na seção de transição da fase densa para fase diluída muda de acordo com a perda de carga estabelecida nos outros componentes do sistema, principalmente na região da válvula de recirculação e *standpipe*, a fim de preservar-se o balanço de pressão no equipamento.

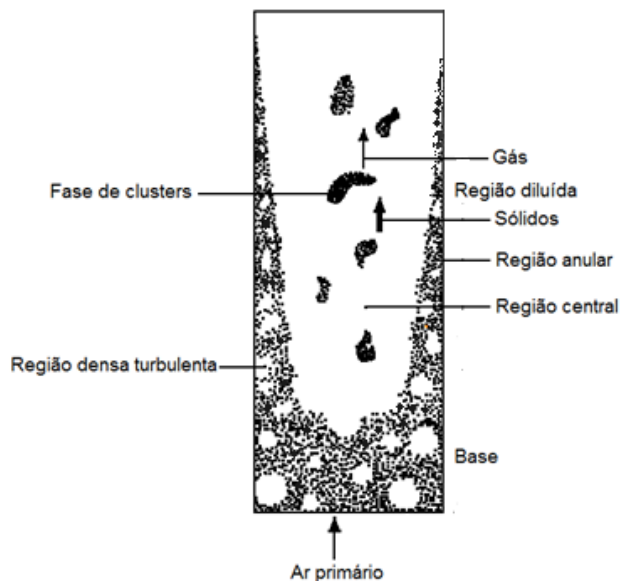
Figura 9 - Efeito do inventário de sólidos sobre a fração de gás ao longo do riser



Fonte: Adaptado de Weinstein *et al.* (1983) *apud* Ramirez - Behainne (2007).

Bader *et al.* (1988) verificaram experimentalmente a existência de um núcleo diluído e uniforme no centro da coluna, e um anel denso de partículas perto das paredes (Figura 10).

Figura 10 - Estrutura núcleo-anular de um LFC



Fonte: Adaptado de Basu (2006).

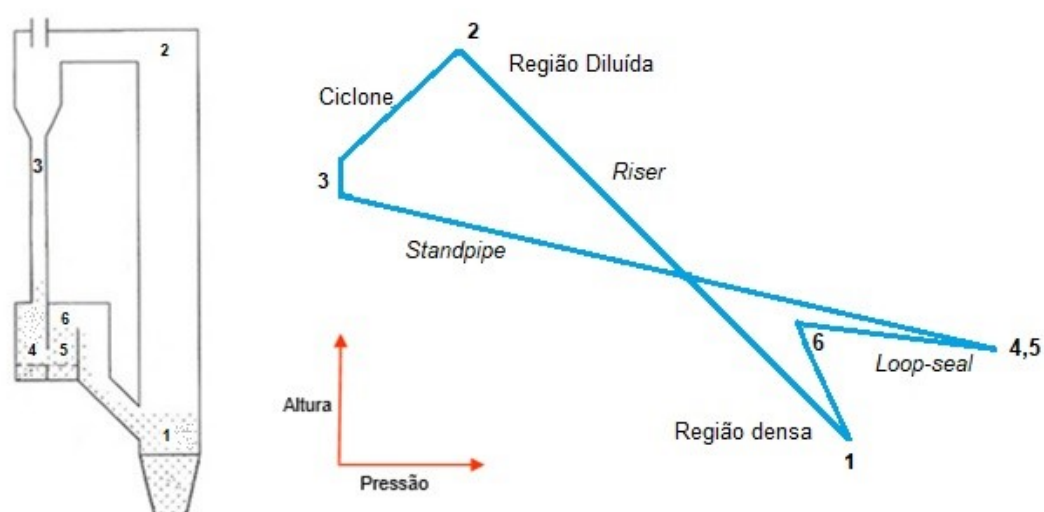
O comportamento fluidodinâmico no sistema de LFC e a taxa de circulação de sólidos dependem fortemente das quedas de pressão em diferentes seções do circuito de fluidização. Os registros das quedas de pressão também são utilizados para a obtenção da distribuição do inventário de sólidos e verificação do balanço de massa do sistema (KIM *et al.*, 2002).

Segundo Basu (2006), o ponto de inflexão do perfil de porosidade que separa a região densa (quedas altas de pressão) da região diluída (quedas baixas de pressão) do LFC, ocorre em função da taxa de circulação de sólidos e do inventário de leito. Devido que o sistema de LFC forma um circuito fechado, uma mudança na queda de pressão em quaisquer um dos componentes alterará automaticamente a condição de queda de pressão nas outras regiões do sistema, logrando-se um novo estado de equilíbrio operacional (RAMIREZ - BEHAINNE, 2007).

Kim *et al.* (2002) mostraram o perfil do balanço de pressão para um sistema de LFC acoplado a uma válvula de recirculação do tipo *loop-seal* (Figura 11). De acordo com os autores, o balanço de pressão no sistema é comandado pela máxima queda experimentada ao longo do circuito, correspondente à região entre a superfície dos sólidos na coluna *standpipe* (ponto 3) e a base da válvula *loop-seal* (ponto 4 ou 5). A diferença de pressão entre esses locais do circuito equivale à soma das quedas de pressão experimentadas no resto das regiões do sistema, de tal forma que:

$$\Delta P_{4,5-3} = \Delta P_{4,5-6} + \Delta P_{6-1} + \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} \quad (8)$$

Figura 11 - Perfil de pressão característico de um sistema de LFC com válvula *loop-seal*



Fonte: Adaptado de Basu (2006) e Ramirez - Behainne (2007).

A pressão máxima atingida no ponto 4 ou 5 impede o aparecimento de um fluxo inverso do escoamento gás-sólido no sentido *riser* - válvula de recirculação de partículas, contribuindo para a manutenção operacional do sistema. De acordo com Pécora (1995), o transporte das partículas ocorre devido à pressão exercida pelo *standpipe* sobre a válvula de recirculação.

A magnitude da queda de pressão em cada componente do sistema de LFC, bem como a forma do perfil de pressão ao longo do circuito, podem ser afetados pela taxa de circulação de sólidos, o inventário de sólidos, a velocidade de fluidização e o modo de aeração na válvula de recirculação, bem como pela geometria específica do circuito de tubulação (RAMIREZ - BEHAINNE, 2007).

2.5 VÁLVULA LOOP-SEAL

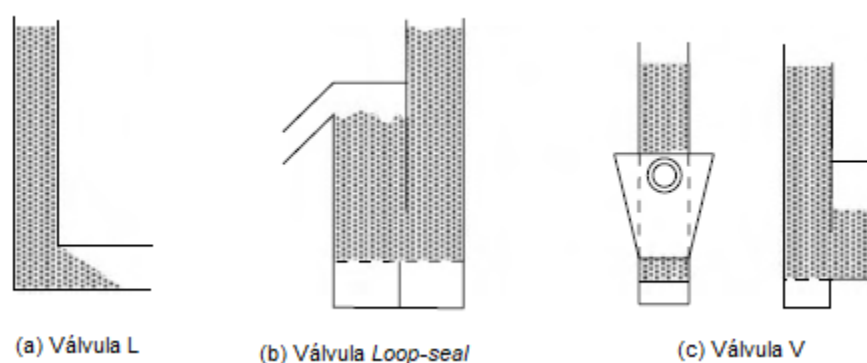
Em sistemas de LFC, os dispositivos de recirculação têm a função de promover, de maneira controlada, o retorno à base do *riser*, das partículas sólidas que foram coletadas pelo ciclone (MORITA, 2009). Esta circulação dos sólidos é realizada com o propósito de manter a estabilidade operacional e controlar o tempo de residência das partículas no leito (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

Os mecanismos de recirculação de sólidos podem envolver dispositivos de acionamento mecânico ou não mecânico, sendo estes últimos, os mais utilizados. Normalmente, dispositivos de reciclagem não mecânicos utilizam válvulas que funcionam com injeção de ar (BASU, 2006). A injeção de ar torna-se necessária para a movimentação dos sólidos no sistema por arraste direto do gás injetado ou como meio facilitador para que o deslocamento de sólidos aconteça pelas próprias forças resultantes do balanço de pressão no circuito de fluidização. A quantidade de gás injetada deve visar o escoamento suave do material, com exceções em casos de processos onde existe potencial de aglomeração de partículas na região do dispositivo de reciclagem. De acordo com Pécora (1995), a geometria do dispositivo de reciclagem e a taxa de aeração influenciam no controle da taxa de circulação dos sólidos.

De acordo com Basu (2006), as válvulas não mecânicas mais utilizadas em um LFC são as do tipo L, *loop-seal* e tipo V (Figura 12). As válvulas do tipo L e *loop-seal*

funcionam melhor com partículas do Grupo B de Geldart. Quando empregadas para partículas do Grupo A, podem ocorrer algumas dificuldades na mobilidade das partículas. No caso do uso de partículas do Grupo D, as dificuldades serão atribuídas ao requerimento de tubos de grande diâmetro e altas vazões de aeração. Devido às dificuldades para fluidizar partículas do Grupo C, válvulas do tipo *loop-seal* ou L convencionais não são adequadas para uso em sistemas de leito fluidizado circulante. Também, partículas com baixos fatores de forma ou esfericidade, como as encontradas em muitas biomassas, podem representar um desafio considerável para o bom funcionamento das válvulas não mecânicas (Figura 12).

Figura 12 - Válvulas não mecânicas

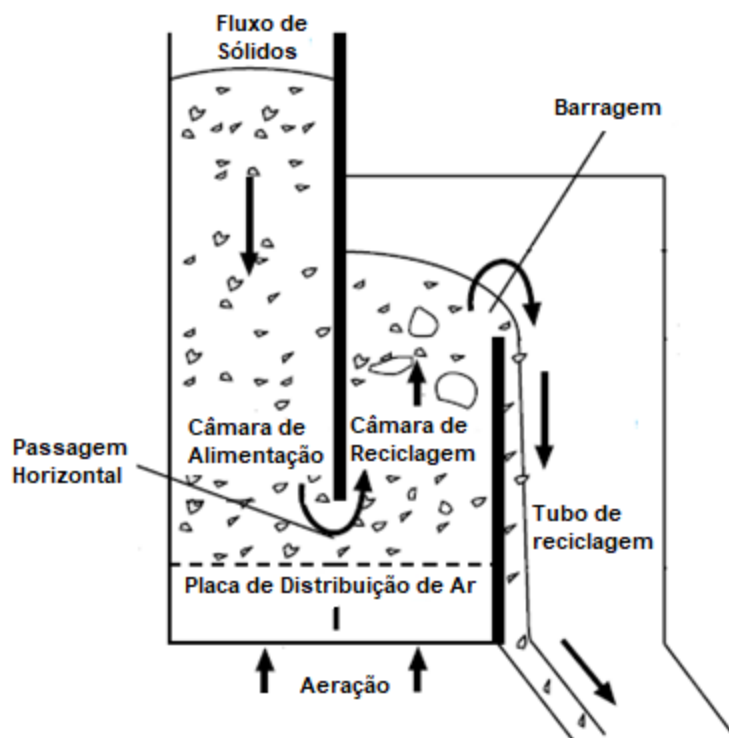


Fonte: Adaptado de Basu (2006).

A válvula *loop-seal* é muito usada em sistemas de LFC, principalmente em equipamentos de escala comercial, garantindo boa estabilidade operacional. De acordo com Basu (2006), esta válvula é dividida em duas seções ou câmaras: câmara de alimentação (*supply chamber*) e câmara de reciclagem (*recycle chamber*), conforme ilustrado na Figura 13. A câmara de alimentação ou de abastecimento é conectada diretamente ao tubo vertical (*standpipe*), fornecendo sólidos à câmara de reciclagem. Os sólidos da câmara de alimentação movem-se horizontalmente através da passagem inferior de uma parede divisória que separa as câmaras de abastecimento e de reciclagem. A câmara de reciclagem, por sua vez, fluidiza estes sólidos para promover a expansão do leito em regime borbulhante. Nesse momento, a câmara funciona como uma represa de sólidos, que ao excederem a altura da barragem, são despejados ao tubo de reciclagem e direcionados para o fundo do *riser*. Os sólidos movimentam-se pela passagem horizontal e sobem pela câmara de reciclagem devido à ação da injeção de ar (aeração) feita na base da válvula *loop-*

seal. Este gás é responsável por diminuir o atrito na passagem horizontal, possibilitando também que o leito se expanda, e que os sólidos transbordem, formando uma camada fluida gás-sólido (lâmina vertente) acima da câmara de reciclagem (Figura 13).

Figura 13 - Movimento dos sólidos através de uma válvula *loop-seal*



Fonte: Adaptado de Basu (2006).

Basu e Cheng (2000) estudaram o funcionamento da válvula *loop-seal* em um leito fluidizado circulante com base no equilíbrio de pressão do circuito de circulação. No trabalho, foram considerados os parâmetros: velocidade do ar na válvula de recirculação, inventário inicial do leito, tamanho do *standpipe*, tamanho da passagem horizontal ou fenda da válvula e diâmetro da partícula. Os pesquisadores observaram que, ao aumentar a velocidade do ar na válvula de recirculação nas duas câmaras simultaneamente, a taxa de fluxo de sólidos também aumenta. Perceberam que a taxa de circulação de sólidos diminuiu à medida que o diâmetro do *standpipe* cresce. Também, notaram que o inventário de leito afeta a taxa de circulação externa de partículas, aumentando com o acréscimo da massa total de partículas sólidas

colocadas no sistema. Menores velocidades do ar de aeração da válvula *loop-seal* promoveram uma diminuição na taxa de circulação dos sólidos.

Kim e Kim (2002), determinaram os efeitos das propriedades das partículas, na reciclagem de sólidos da válvula *loop-seal*, e também o perfil de pressão nas duas câmaras separadamente, na alimentação e na reciclagem. Na câmara de alimentação constataram o aumento de pressão com o decréscimo na taxa de circulação de sólidos (G_s), ao utilizar partículas com diâmetros maiores. Além disso, perceberam que, para manter constante a taxa de circulação de partículas maiores e mais densas, foi necessário aumentar a taxa de aeração vertical, mantendo fixa a aeração na parte inferior das duas câmaras. Também, os pesquisadores observaram que o valor de G_s máximo obtido permaneceu praticamente constante, independentemente do tamanho da partícula.

Basu e Butler (2009) estudaram o fluxo de sólidos através da válvula *loop-seal* e o efeito de vários parâmetros operacionais e de projeto. Os experimentos mostraram que a taxa de fluxo de sólidos torna-se limitada sob certas condições operacionais. A partir de uma condição de leito fixo, ao aumentar a taxa de aeração da *loop-seal*, a taxa de sólidos também incrementou. No entanto, quando a aeração ultrapassou certo valor, o fluxo de circulação dos sólidos permaneceu praticamente constante. Essa condição de estabilidade foi avaliada para diversos tamanhos de comprimento da passagem horizontal, sendo determinado que o valor efetivo de aeração no qual o fluxo de sólidos estabiliza diminuiu com o aumento do comprimento da passagem horizontal. Os autores atribuíram este fato às mudanças na resistência ao fluxo gás-sólido que a passagem horizontal oferece, e que em certas condições de aeração torna-se alta demais.

Wang *et al.* (2014), avaliaram o desempenho das válvulas *loop-seal* do tipo “U” e “N” no fluxo gás-sólido de um sistema de LFC. A válvula do tipo “U” a aeração é feita na parte inferior das câmaras de alimentação e reciclagem, já para a válvula tipo “N” a aeração foi feita de dois modos (monocâmara e bicâmara). Para o modo de aeração monocâmara o ar foi injetado no fundo da câmara de reciclagem e para o modo bicâmara, a injeção de ar foi aplicada na parte inferior da câmara de reciclagem e também houve aeração vertical localizada um pouco acima da câmara de alimentação, de forma perpendicular ao *standpipe*. Os autores constataram que a válvula do tipo “U” necessita de maior velocidade de aeração u_{als} para o início da fluidização na *loop-seal*. Devido à menor resistência dos sólidos na passagem com

declive da válvula do tipo “N”, a taxa externa do fluxo de sólidos é maior, com um menor número de fluidização (u_{als}/u_{mf}). A válvula “N” com o modo de aeração bicâmara obteve maior G_S , com o acréscimo de (u_{als}/u_{mf}), na qual a aeração vertical gerou um efeito deslizante para o escoamento de sólidos na válvula. Entretanto, para a válvula do tipo “U” o G_S se estabilizou com valores maiores, para o mesmo número de fluidização, comparando com o modo de aeração monocâmara da válvula do tipo “N”. Por fim, observou-se que com o aumento de (u_{als}/u_{mf}) houve o acréscimo de G_S e atingiu um valor máximo para todos os modos e configuração da válvula *loop-seal*, que é a taxa de transporte de sólidos máxima do gás para o *riser*.

Li *et al.* (2014) fizeram um estudo semelhante ao de Kim e Kim (2002), porém utilizando aeração apenas na câmara de reciclagem. A pesquisa incluiu a análise da queda de pressão nesta região. Os autores observaram que a taxa de fluxo de sólidos aumenta com o incremento da aeração na câmara de reciclagem a uma velocidade do gás constante no *riser*. No entanto, notou-se uma diminuição na queda de pressão nessa câmara, efeito atribuído à variação na porosidade do leito na região, a qual aumenta pela expansão do leito. Quando a aeração na câmara de reciclagem foi mantida constante, e tinha-se um aumento da velocidade do gás de fluidização no fundo do *riser*, a taxa de fluxo de sólidos incrementou, mas a queda de pressão na câmara de reciclagem permaneceu constante. A explicação dada a este comportamento foi atribuída ao fato da não alteração na porosidade do leito com a manutenção da taxa de aeração.

Li *et al.* (2017) fizeram um estudo semelhante ao apresentado por Li *et al.* (2014), porém utilizaram aeração nas câmaras de alimentação e reciclagem, tendo regime de leito fluidizado nas duas câmaras. Os autores observaram pouca influência na taxa do fluxo de sólidos ao incrementar a taxa de aeração na câmara de reciclagem e mantendo fixa uma parcela da aeração total na câmara de alimentação, porém, houve um aumento na porosidade da câmara de reciclagem. Também notaram que ao aumentar a velocidade de fluidização do *riser*, a taxa de fluxo de sólidos crescia. Adicionalmente, foi observado que a altura de sólidos no *standpipe* cresce com o incremento do inventário de sólidos ao manter a mesma taxa de aeração em ambas as câmaras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descrevem-se os métodos, os materiais e os procedimentos adotados para o cumprimento dos objetivos desta dissertação. Inicialmente, detalham-se as características do sistema experimental e o aperfeiçoamento realizado nele relacionada à instalação de um medidor da taxa de circulação de sólidos. Posteriormente, apresentam-se as propriedades do material do leito, o planejamento experimental e os procedimentos seguidos durante os ensaios.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental utilizado na pesquisa consiste de uma Unidade de Fluidização Rápida a Frio (UFRAF), pertencente ao Laboratório de Processos Termoquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Ponta Grossa. A UFRAF (Fotografia 1) é dividida em três subsistemas: circuito de fluidização, fornecimento de ar de fluidização e aeração da válvula de recirculação dos sólidos.

Fotografia 1 - Vista geral da UFRAF

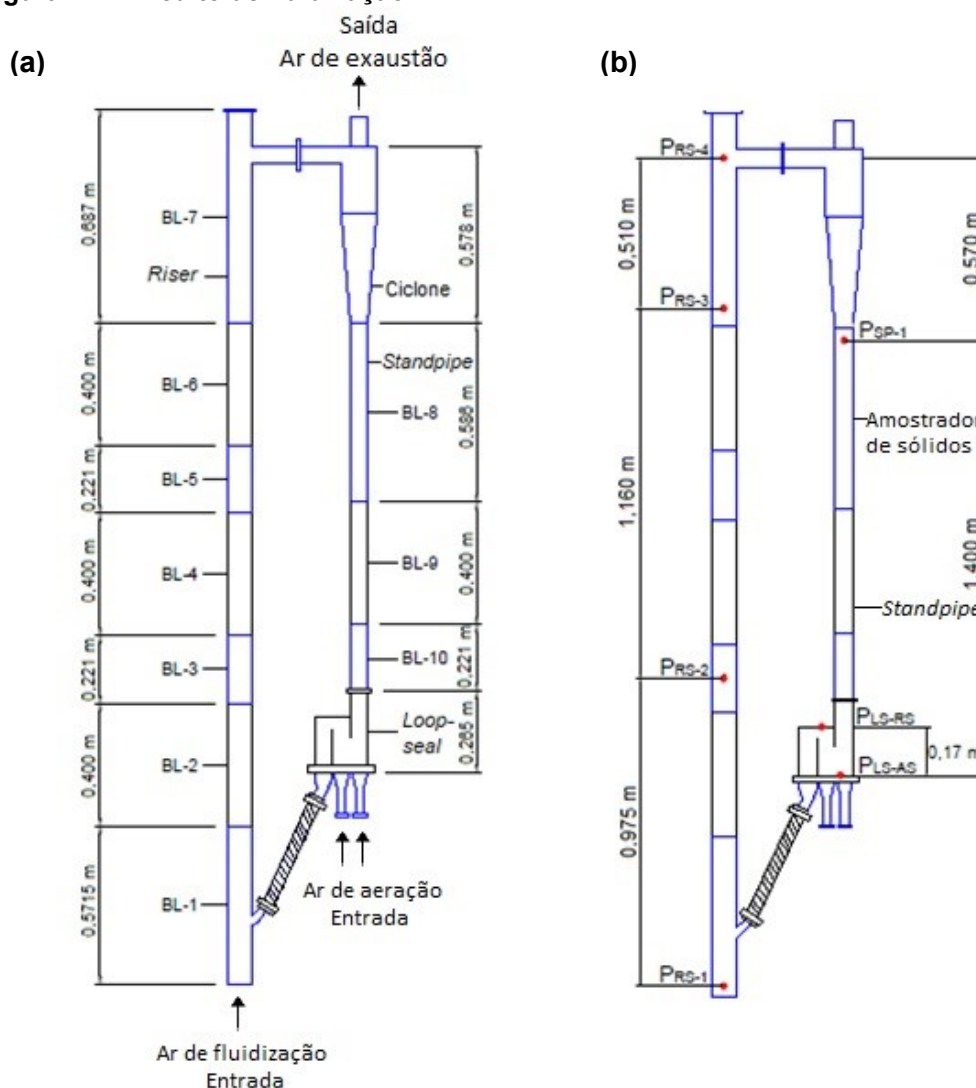


Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Circuito de Fluidização

O circuito de fluidização (Figura 14) é composto pelos seguintes elementos: *riser*, ciclone para separação de partículas, *standpipe* e válvula de recirculação de sólidos do tipo *loop-seal*. O circuito foi fabricado em aço carbono e acrílico, com o intuito de se obter maior resistência às condições de operação e também para permitir a observação visual do escoamento gás-sólido. A coluna do *riser* apresenta seção transversal circular, com diâmetro interno de 0,078 m e altura de 2,85 m. O *riser* é composto por sete módulos, quatro deles são construídos em aço carbono (BL-1, BL-3, BL-5 e BL-7) e, os outros três, em acrílico (BL-2, BL-4 e BL-6).

Figura 14 - Circuito de fluidização

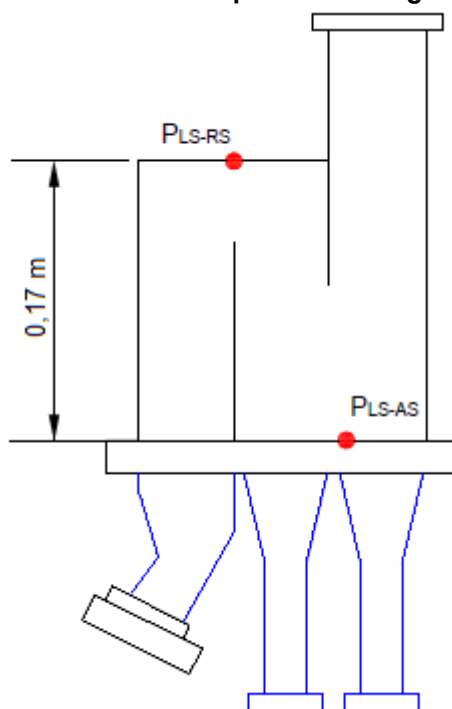


Fonte: Autoria própria.

No *riser*, a pressão estática do escoamento gás-sólido é medida em quatro seções verticais, utilizando-se as tomadas P_{RS-1} , P_{RS-2} , P_{RS-3} , e P_{RS-4} . Assim, a queda de pressão no comprimento do *riser* corresponde à diferença das leituras registradas pelas tomadas P_{RS-4} e P_{RS-1} , enquanto que a queda de pressão no ciclone é determinada mediante a leitura diferencial registrada pelas tomadas P_{RS-4} e P_{SP-1} . Já, no *standpipe*, a pressão diferencial é medida entre os pontos P_{SP-1} e P_{LS-AS} .

Finalmente, na válvula *loop-seal*, existem quatro tomadas de pressão que possibilitam a determinação, em separado, da queda de pressão na câmara de alimentação, na câmara de reciclagem e na passagem horizontal existente entre as duas. Para este estudo, optou-se por utilizar apenas as tomadas de pressão distribuídas na válvula *loop-seal* ilustradas na Figura 15. Tendo em vista que a queda de pressão experimentada na passagem horizontal entre câmaras desta válvula *loop-seal* do tipo U é pequena (RATTI, 2015), as quedas de pressão escolhidas para análise foram as da câmara de reciclagem (leitura diferencial entre as tomadas P_{LS-AS} e P_{LS-RS}), e que a queda de pressão na câmara de alimentação, neste caso, correspondente à registrada na região do *standpipe*.

Figura 15 -Localização das tomadas de pressão na região da válvula *loop-seal*



Fonte: Autoria própria.

As tomadas de pressão selecionadas para o registro do perfil de pressão ao longo do circuito de fluidização foram conectadas, por mangueiras pneumáticas e acessórios de engate rápido, a manômetros de tubo em “U” preenchidos com água destilada, utilizados para as leituras de pressão ao longo do circuito de fluidização (P_{RS-1} , P_{RS-2} , P_{RS-3} , P_{RS4} , P_{SP-1} , P_{LS-AS} , e P_{LS-RS}). Estes manômetros têm escala de 0 mmH₂O a 1000 mmH₂O (exceto um deles, que pode medir de 0 mmH₂O a 1700 mmH₂O no caso da leitura de pressão a montante na placa de orifício, seção 3.1.2), com divisão mínima de 1,0 mm e incerteza de $\pm 0,5$ mmH₂O.

Fotografia 2 - Painel de manômetros do tipo “U” para indicação das leituras de pressão no circuito de fluidização



Fonte: Autoria Própria.

O módulo superior da coluna *riser* (Fotografia 3) conecta à um tubo de seção retangular, que se prolonga até a entrada de um ciclone de tipo tangencial. Neste ciclone, acontece a separação das partículas transportadas pelo escoamento gás-sólido.

Fotografia 3 - Parte superior do riser e ciclone



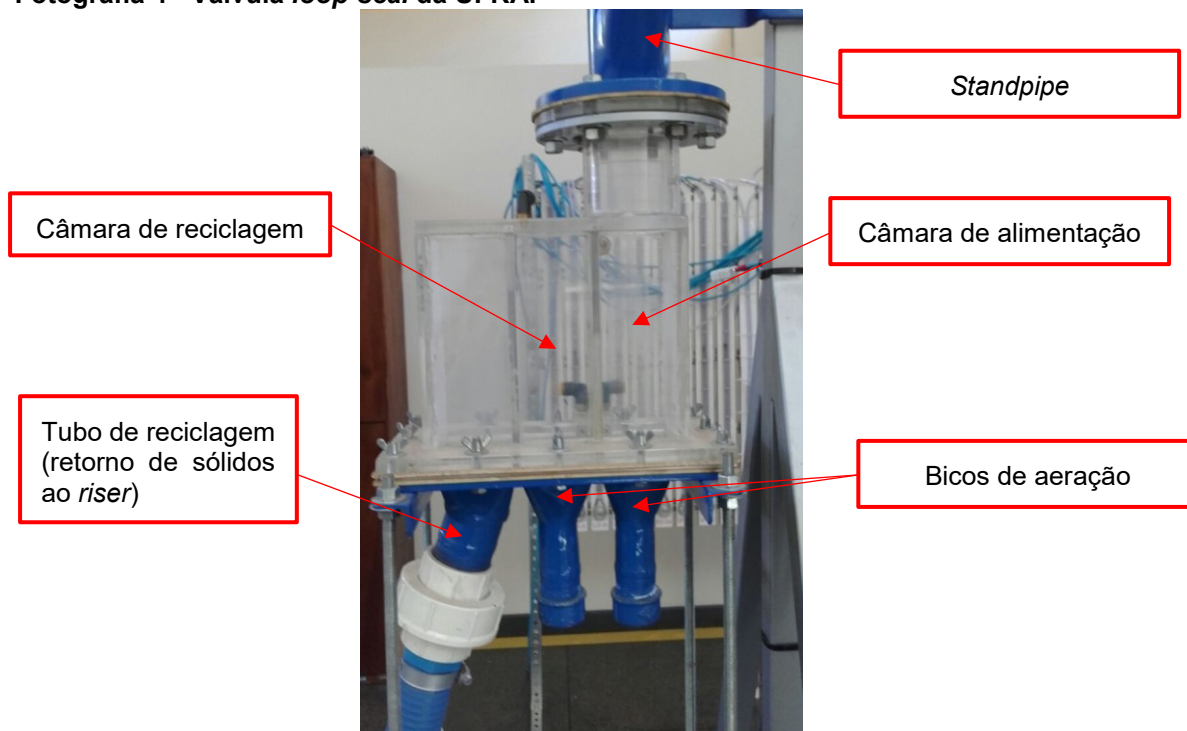
Fonte: Autoria própria.

O gás e as partículas mais finas liberadas pelo ciclone pela parte superior, passam por uma conexão tipo “T” de aço carbono, utilizada para a alimentação do inventário de sólidos ao circuito de fluidização, bem como para direcionar o escoamento para uma mangueira de 2 polegadas de diâmetro com saída para a parte exterior do laboratório.

Na parte inferior do ciclone está conectada a coluna de retorno ou *standpipe*, que tem a função de conduzir os sólidos separados pelo ciclone até a válvula de recirculação. O *standpipe* é constituído por 3 módulos (BL-8, BL-9 e BL-10), tendo comprimento total de 1,207 m e diâmetro nominal de 2,5 polegadas. Os módulos BL-8 e BL-10 foram construídos em aço carbono e, o módulo BL-9, construído em acrílico para permitir a observação da altura da coluna de sólidos e do comportamento fluidodinâmico das partículas. No módulo BL-10, os sólidos são retirados com o auxílio de um aspirador de pó após a realização dos experimentos, através do acesso liberado por uma conexão tipo “Y” de 1,5 polegadas de diâmetro nominal.

Na base do *standpipe* encontra-se uma válvula de recirculação de sólidos do tipo *loop-seal*, que promove o retorno dos sólidos à parte inferior do *riser*. A válvula, visualizada na Fotografia 4, foi construída em acrílico e apresenta seção transversal quadrada nas suas duas câmaras de alojamento de sólidos, com seus lados internos medindo 0,059 m. Possui câmara de reciclagem com altura da barragem de 0,12 m. A base da válvula conecta a dois bicos que permitem a aeração independente nas câmaras de alimentação e de reciclagem. A base da válvula é desmontável e construída em aço carbono. Os sólidos que transbordam a barragem são conduzidos pelo tubo de reciclagem até a região densa do *riser*.

Fotografia 4 - Válvula *loop-seal* da UFRAF



Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Subsistema Fornecedor do Ar de Fluidização

A fluidização das partículas no circuito acontece por meio da injeção de ar na base do *riser*. O ar utilizado na fluidização é impulsado por um soprador tipo radial da marca *AEROMACK*, modelo CRE-04, alimentado por um motor elétrico de 4 cv de potência (Fotografia 5). A vazão de ar fornecida pelo aerador é regulada por inversor de frequência, da marca *WEG*, modelo CFW300B15P2T2DB20. Na saída do soprador existe uma conexão tipo “T” de 2 polegadas de diâmetro, na qual foi instalada uma válvula do tipo esfera para *by-pass* de 1 polegada de diâmetro. Essa válvula tem a finalidade de liberar o ar excedente do sistema, auxiliando no controle de vazão de ar de fluidização durante a operação de bloqueio e limpeza do circuito.

À jusante da conexão “T”, está instalada uma válvula do tipo esfera de 2 polegadas de diâmetro, utilizada para bloquear subitamente o ar de fluidização no término de cada experimento, a fim de possibilitar a determinação da distribuição do inventário de partículas no circuito. Perto do local está posicionado um termoresistor PT-100, conectado a um indicador digital de temperatura da marca *NOVUS* para o registro da temperatura do fluxo de ar de fluidização.

Fotografia 5 - Soprador, *by-pass*, válvula globo e sensor de temperatura PT-100



Fonte: Autoria própria.

Após a localização do termoresistor, uma seção reta de tubulação com conexão flangeada suporta um medidor de vazão do tipo placa de orifício, utilizado para quantificar o ar de fluidização fornecido ao *riser* (Fotografia 6). A vazão do ar de fluidização que atravessa este dispositivo é obtida mediante o conhecimento do diâmetro do orifício da placa (30 mm neste estudo), do diâmetro interno da tubulação, da pressão diferencial registrada entre as tomadas da placa e da pressão absoluta à montante do ar, bem como da temperatura do fluido.

O valor da pressão diferencial na placa de orifício (ΔP_{OJ-M}) é obtida através das medidas de dois manômetros de tubo em “U”, um com escala de 0 mmH₂O a 1.000 mmH₂O e outro com escala 0 mmH₂O a 1.700 mmH₂O, com divisão mínima de 1,0 mm e incerteza de $\pm 0,5$ mm. Os cálculos necessários para a obtenção da vazão do ar de fluidização, e conseqüentemente, da velocidade de fluidização na base do *riser*, seguem o equacionamento apresentado na norma NBR-ISO 5167-1 (1994), implementado no *software* comercial *Engineering Equation Solver – EES*®.

Fotografia 6 - Medidor de vazão de ar tipo placa de orifício



Fonte: Autoria própria.

O ar que atravessa a seção da placa orifício avança até uma conexão tipo “T” com seção redutora de 2 polegadas para 1 polegada de diâmetro (Fotografia 7). A derivação superior desta conexão leva o ar até a câmara *plenum* do sistema de fluidização. A derivação inferior recebe uma válvula tipo diafragma, que tem a função de auxiliar a retirada de partículas procedentes do *riser*, eventualmente presentes no local após o término dos experimentos.

Fotografia 7 - Conjunto de tubulação acoplado na parte inferior do *riser*



Fonte: Autoria própria.

Na parte superior do *plenum* aloja-se uma placa distribuidora do tipo *Tuyere* (Fotografia 8). Esta placa distribuidora é utilizada para uniformizar o fornecimento do ar de fluidização na seção de entrada do leito e suportar o peso do material sólido durante o processo, ajudando também a minimizar o retorno dos sólidos alojados na base do *riser*.

Fotografia 8 - Distribuidor de ar tipo *Tuyere* alojado no topo do *plenum*



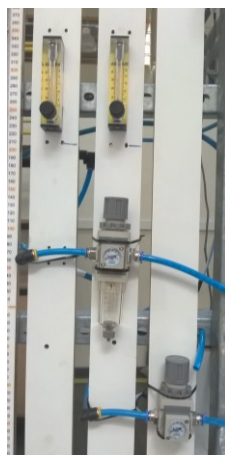
Fonte: Pecete (2014).

3.1.3 Subsistema de Aeração da Válvula de Recirculação

Este subsistema tem a finalidade de fornecer ar comprimido na válvula *loop-seal* para possibilitar a recirculação dos sólidos no sistema de LFC. O ar utilizado para este propósito é fornecido por um compressor tipo parafuso da marca FIAC, com motor elétrico de 25 cv de potência. O ar alimentado na válvula *loop-seal* faz seu ingresso através de dois bicos de injeção, localizados na base das câmaras de alimentação e de reciclagem. O controle de pressão de ar na linha de aeração é realizado por uma válvula reguladora de pressão com escala de 0 bar a 10 bar, com dispositivo para retenção de umidade.

O fluxo de ar é medido por meio de dois rotômetros (R1 e R2) instalados em paralelo, da marca *Omega*, modelo FL-2516-V, com diâmetro nominal de entrada de 1/8 de polegada. Os rotômetros possuem escala de 4 SL/min a 22 SL/min (litros por minuto a condições padrão de 20°C e 1 atm) e incerteza de ± 1 SL/min. Ambos os rotômetros possuem válvulas do tipo agulha acopladas ao corpo, usadas para regular a taxa volumétrica da aeração (Fotografia 9).

Fotografia 9 - Reguladores de pressão e rotômetros do mecanismo de aeração

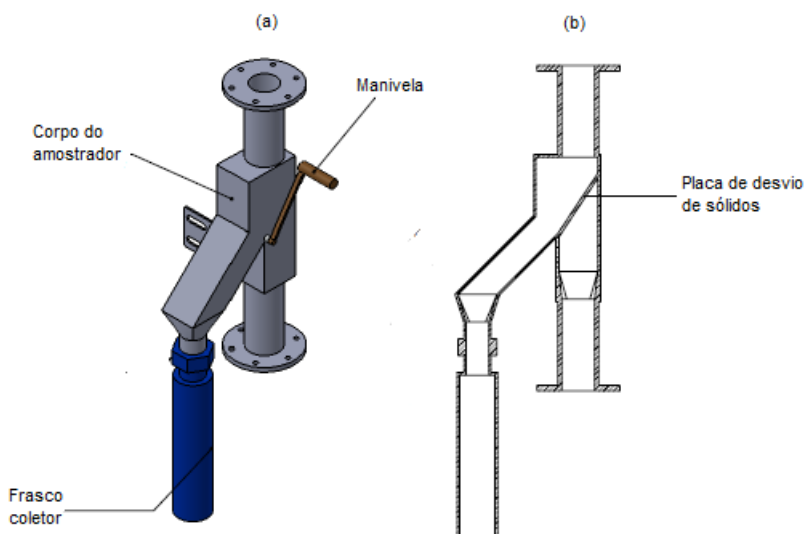


Fonte: Autoria Própria.

3.2 INSTALAÇÃO DO AMOSTRADOR DE SÓLIDOS

A configuração original da UFRAF não permitia quantificar a taxa de circulação dos sólidos (G_S) em trânsito pelo circuito de fluidização. Uma vez que este parâmetro é considerado essencial no estudo da fluidodinâmica dos sistemas de LFC, um amostrador de partículas do tipo divergente ou de dois caminhos, de simples manuseio e construção de baixo custo, similar ao utilizado por Ramirez - Behainne (2007), foi projetado e instalado no sistema experimental. A Figura 16(a) e Figura 16(b) mostra o esquema do amostrador de sólidos proposto, com vista 3D e de corte lateral, respectivamente.

Figura 16 - Amostrador de sólidos



Fonte: Autoria própria.

O dispositivo funciona ao acionar a manivela, desviando temporariamente, para um frasco coletor, o fluxo de sólidos que desce pelo *standpipe*. A taxa de circulação de sólidos foi determinada medindo-se a massa de partículas coletadas no frasco em cinco períodos de tempo (2 s, 4 s, 6 s, 8 s e 10 s). Adicionalmente, no cálculo do G_S foi considerada a área da seção transversal do *standpipe*. O amostrador de sólidos foi instalado na região superior do *standpipe*, à altura do módulo (BL-8), conforme visualizado na Fotografia 10.

Fotografia 10 - Amostrador de sólidos instalado na UFRAF



Fonte: Autoria própria.

Testes preliminares permitiram verificar o correto dimensionamento e funcionamento do amostrador, conseguindo coletar massa de sólidos na faixa de 75 a 1200 gramas nos períodos de amostragem previamente definidos e sem vazamento de partículas.

3.3 MATERIAL DO LEITO E CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas utilizadas neste estudo correspondem à da areia quartzosa, fornecida pela empresa GR Extração de Areia e Transrodoviaros Ltda., localizada na cidade de Ponta Grossa-PR. Este tipo de areia é amplamente utilizado como material inerte de leito em sistemas de LFC envolvendo processos de conversão termoquímica, tais como combustão e gaseificação. Neste estudo, foram

caracterizadas as seguintes propriedades das partículas do leito: diâmetro médio de *Sauter*, densidade real e esfericidade.

As partículas do leito foram pré-classificadas em peneiras de escala industrial com abertura de 150 μm e 300 μm . A determinação do diâmetro médio de *Sauter* das partículas foi feita mediante a técnica de peneiramento, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), na qual foi utilizado um peneirador eletromagnético da marca Contenco, modelo I1016B, com as peneiras de abertura de malha 75 μm , 150 μm , 180 μm , 212 μm , 300 μm da série Tyler, obtendo-se o valor médio de 183 μm . Os testes foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil, da Faculdade de Telêmaco Borba - FATEB.

A densidade real da areia foi determinada por picnometria, conforme a ME 093/94 (DNER, 1994), onde foram pesados aproximadamente 5 g de areia, em uma balança analítica da marca *Shimadzu*, modelo AY220. A areia foi mergulhada em água destilada em um picnômetro de 25 mL, obtendo-se o valor médio de 2,712 g/cm³. Os testes foram realizados no Laboratório de Química da FATEB.

Para esta areia, a esfericidade das partículas foi previamente determinada por Turini (2017), utilizando o método proposto por Peçanha e Massarani (1986 apud Cortez *et al.*, 2008). Neste método, o valor da esfericidade é calculado pela razão entre o diâmetro inscrito e o diâmetro circunscrito em torno da partícula. Estes diâmetros foram medidos com o auxílio de um microscópio ótico, marca *Olympus*, modelo BX60, com resolução de 1000x, localizado no Laboratório de Metalografia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Ponta Grossa. As amostras, contendo aproximadamente 30 partículas, foram fotografadas com a câmera *Evolution® LC Color*, que é acoplada ao microscópio, em imagens 50x e 100x, aumentadas e processadas pelo programa *AnalySIS®*. O valor médio encontrado para a esfericidade foi de 0,69.

De acordo com as informações obtidas das características da areia, ela pertence ao Grupo B da classificação de Geldart, sendo, portanto, apropriadas para seu uso em sistemas fluidizados (GELDART, 1973).

3.4 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados visando determinar a influência do modo de aeração da válvula de recirculação de sólidos (*loop-seal*) da UFRAF. Portanto, como variáveis de estudo, foram considerados os modos de injeção monocâmara e bicâmara, bem como, a taxa de aeração utilizada em ambos os modos.

Com base em informação experimental levantada em estudos preliminares realizados na UFRAF (PECETE, 2014; BORO, 2015; RATTI 2015), foram escolhidos os valores das outras variáveis operacionais que, em princípio, garantiriam condições estáveis de funcionamento, usando: leito de partículas com diâmetro médio de 183 μm ; velocidade mínima de fluidização, $u_{mf} = 0,035$ m/s; velocidade terminal, $u_t = 1,84$ m/s) inventário de leito de 5 kg; e velocidade de fluidização no *riser* de 4 m/s. Testes preliminares realizados com os rotâmetros instalados no sistema indicaram uma faixa apropriada para a taxa de aeração total na válvula *loop-seal*, compreendida entre 20 SL/min a 36 SL/min.

No modo de aeração monocâmara, a injeção de ar é realizada somente em uma das câmaras da válvula *loop-seal*. Dessa forma, o ar injetado deverá ser fornecido em quantidade suficiente na câmara para produzir o vertimento de partículas em direção ao tubo de reciclagem. Já, na aeração bicâmara, as duas câmaras da *loop-seal* foram abastecidas com ar, mantendo-se a mesma vazão total dos casos de aeração monocâmara.

Para a realização dos experimentos, foram planejadas as combinações de variáveis controláveis descritas na Tabela 1.

Tabela 1- Planejamento experimental

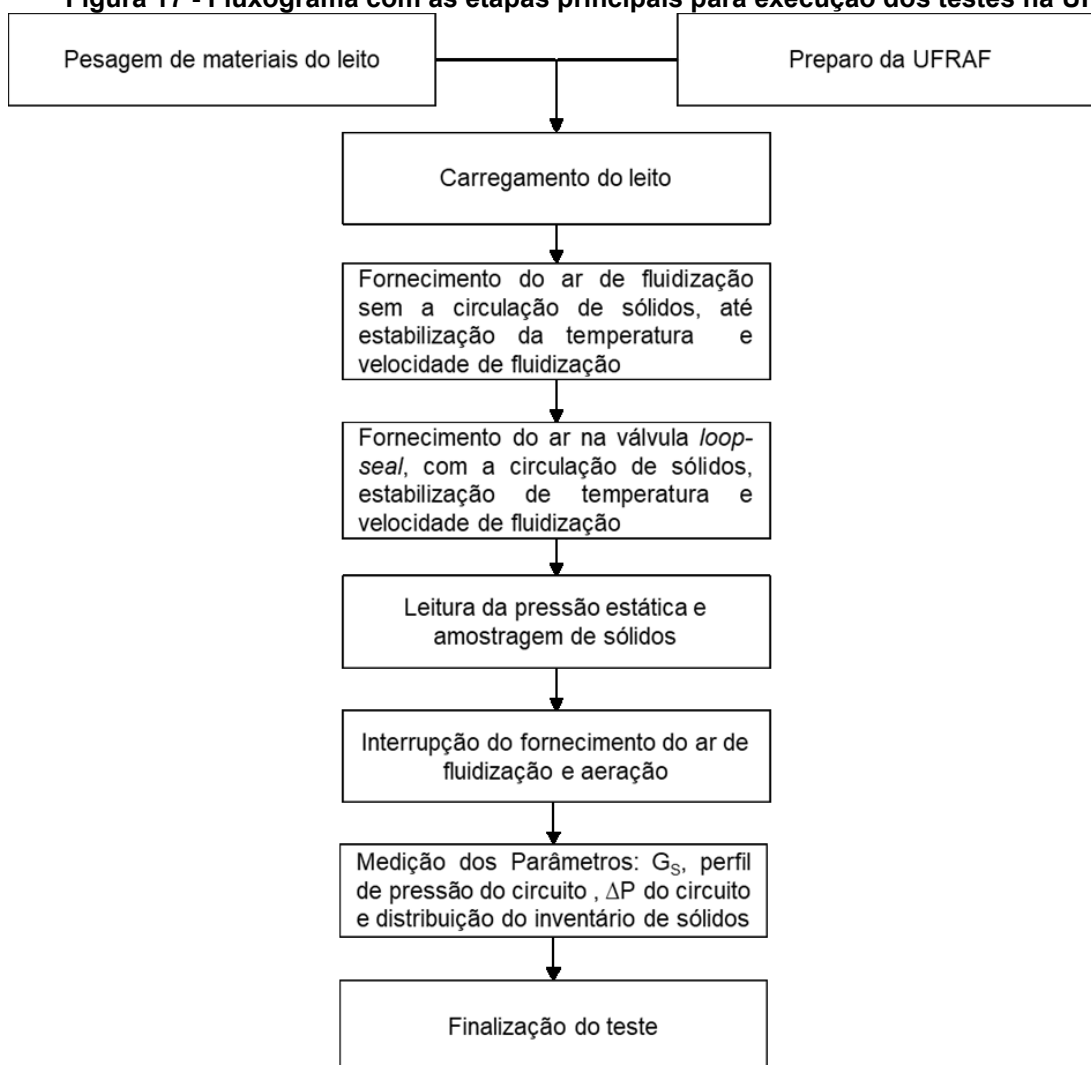
Número do teste	Modo de Aeração	Rotâmetro 1 (SL/min)	Rotâmetro 2 (SL/min)	Taxa de aeração na câmara de reciclagem (SL/min)	Taxa de aeração na câmara de alimentação (SL/min)	Taxa de aeração Total (SL/min)
1	Monocâmara	10	10	20	-	20
2	Monocâmara	12	12	24	-	24
3	Monocâmara	14	14	28	-	28
4	Monocâmara	16	16	32	-	32
5	Monocâmara	18	18	36	-	36
6	Monocâmara	10	10	-	20	20
7	Monocâmara	12	12	-	24	24
8	Monocâmara	14	14	-	28	28
9	Monocâmara	16	16	-	32	32
10	Monocâmara	18	18	-	36	36
11	Bicâmara	16	4	16	4	20
12	Bicâmara	16	8	16	8	24
13	Bicâmara	16	12	16	12	28
14	Bicâmara	16	16	16	16	32
15	Bicâmara	16	20	16	20	36
16	Bicâmara	16	4	4	16	20
17	Bicâmara	16	8	8	16	24
18	Bicâmara	16	12	12	16	28
19	Bicâmara	16	16	16	16	32
20	Bicâmara	16	20	20	16	36
Número total de testes:						20

Fonte: Autoria Própria.

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 17 apresenta a sequência das etapas executadas durante a realização dos testes experimentais.

Figura 17 - Fluxograma com as etapas principais para execução dos testes na UFRAF



Fonte: Adaptado de Boro (2015).

A distribuição do inventário de sólidos é obtida através de uma manobra realizada no término de cada teste experimental. Essa manobra consiste na interrupção súbita e simultânea do ar de fluidização e do ar de aeração. A massa de sólidos, depositada nos componentes do LFC após a interrupção, é retirada do sistema com o auxílio de um aspirador de pó e pesada em balança digital com incerteza de $\pm 0,5$ g.

O tratamento dos dados experimentais obtidos inclui uma análise de variância (ANOVA), a fim de verificar a significância dos efeitos ocasionados pelos modos e pela taxa de aeração utilizados na válvula *loop-seal* nas condições experimentais testadas. Esta análise estatística foi realizada por meio do *software Microsoft Excel*TM.

A ANOVA compara a variância entre as médias de grupos com a variância dentro dos grupos. Neste trabalho, foi utilizado o fator duplo sem repetição. O teste de hipótese é realizado mediante o teste de igualdade entre as médias, utilizando o teste F. A hipótese nula afirma que todas as médias dos grupos são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente, dentro de um nível de significância (α) previamente definida (0,05).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos testes experimentais. Inicialmente, foi investigado o tempo de amostragem de sólido em relação da taxa de circulação das partículas, para os modos e as taxas de aeração planejadas. Na sequência, foi analisado o perfil axial de pressão estática, a queda de pressão em cada componente do circuito de fluidização e a distribuição final do inventário de sólidos, também em função do modo de aeração e da taxa de injeção de ar na válvula *loop-seal*. Além disso, foram realizadas análises de variância-ANOVA, a fim de verificar a significância estatística dos efeitos ocasionados pelos modos de aeração monocâmara e bicâmara utilizados na válvula *loop-seal* nas condições experimentais testadas (ver Apêndice A). Os resultados obtidos foram confrontados com os reportados em outros trabalhos da literatura.

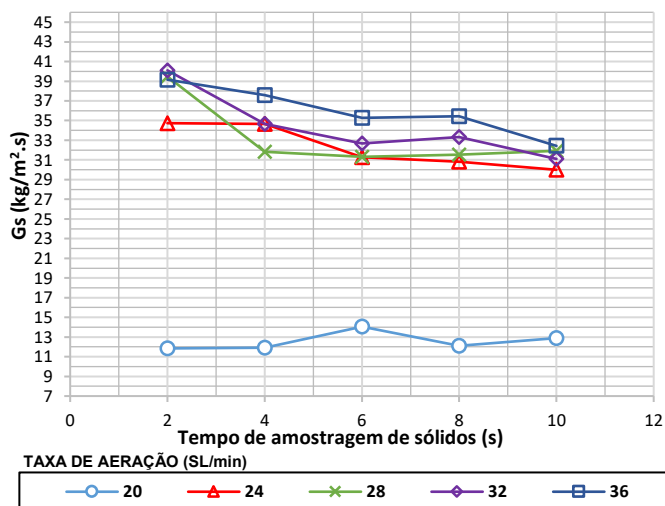
4.1 EFEITO DO TEMPO DE AMOSTRAGEM NA TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS

O Gráfico 1 apresenta o comportamento da taxa de circulação de sólidos (G_S) em função do tempo de amostragem ou do período em que uma porção de partículas foi desviada do fluxo gás-sólido normalmente transitando pelo *standpipe*. Os períodos de amostragem foram variados de 2 s até 10 s, com incrementos de 2 s entre amostras e para ambos os modos de aeração. Assim, foram realizadas cinco medições de G_S por cada condição operacional estabelecida no planejamento experimental. Os resultados relativos aos dez primeiros testes (condição com modo de aeração monocâmara e variação da taxa de aeração de 20 SL/min até 36 SL/min, com incrementos de 4 SL/min) estão ilustrados no Gráfico 1(a) e 1(b).

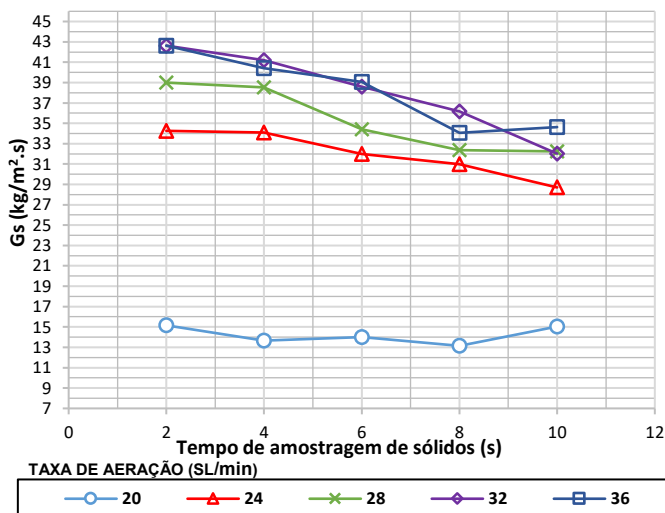
No Gráfico 1(a), pode-se observar que, com exceção do teste correspondente à taxa de aeração de 20 SL/min no modo monocâmara, houve um decréscimo do G_S com o aumento no tempo de amostragem. Esse comportamento pode ser explicado pela característica intrusiva do próprio método de medição, uma vez que ele promove um ajuste automático e contínuo do balanço de pressão no circuito com a diminuição gradativa da massa de sólidos remanescente no sistema. Assim, ao aumentar o período de amostragem, o diferencial de pressão desenvolvido na válvula *loop-seal* deverá diminuir, transferindo menor quantidade de partículas de volta ao *riser*.

Gráfico 1 - Comportamento da taxa de circulação de sólidos em relação ao período de amostragem e taxa de aeração

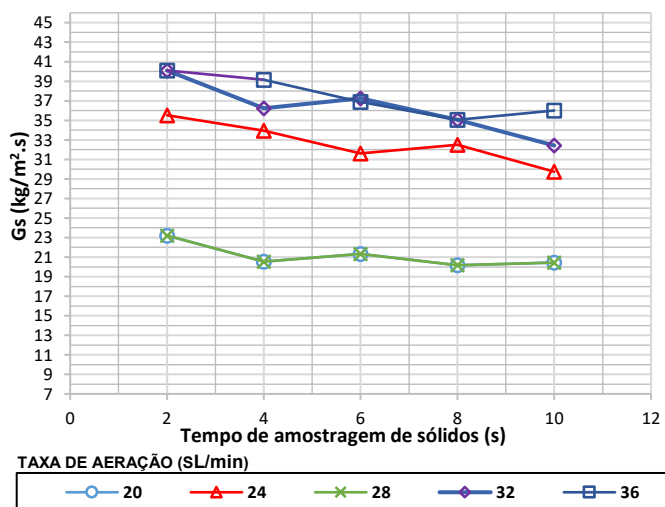
(a) MODO MONOCÂMARA COM AERAÇÃO NA CÂMARA DE RECICLAGEM



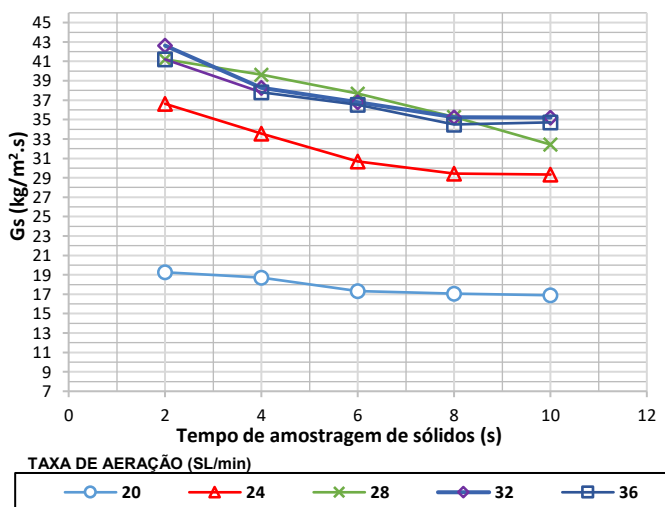
(b) MODO MONOCÂMARA COM AERAÇÃO NA CÂMARA DE ALIMENTAÇÃO



(c) MODO BICÂMARA COM AERAÇÃO VARIÁVEL NA CÂMARA DE ALIMENTAÇÃO



(d) MODO BICÂMARA COM AERAÇÃO VARIÁVEL NA CÂMARA DE RECICLAGEM



Fonte: Autoria própria.

O efeito anteriormente descrito foi praticamente anulado na condição de taxa de aeração de 20 SL/min (valor mínimo para operação estável do LFC), tornando-se mais importante à medida que a taxa de aeração aumenta, como confirmado pela mudança na inclinação das curvas. Este resultado mostra-se coerente, uma vez que ao operar o LFC na condição de G_s mínimo, pouca massa de leite é retirada do

inventário, mesmo durante 10 s de período de coleta, não conseguindo afetar o valor da taxa de circulação de sólidos.

Ao comparar as duas modalidades de aeração monocâmara, observa-se que a injeção de ar em apenas a câmara de alimentação parece promover maior variação no valor de G_S com o tempo de amostragem, principalmente em altos valores da taxa de aeração.

Os resultados pertinentes à condição com modo de aeração bicâmara estão apresentados no Gráfico 1(c) e 1(d). Nota-se um comportamento similar ao caso de aeração monocâmara do Gráfico 1(a) e 1(b), porém, com este modo de aeração promovendo agora variações de G_S mais parecidas entre as duas combinações de aeração bicâmara analisadas. Tal comportamento sugere que qualquer combinação na distribuição da aeração bicâmara aplicada na *loop-seal* não leva a mudanças na inclinação das curvas de G_S entre períodos de coleta correspondentes.

O Gráfico 2 apresenta uma comparação direta dos valores de G_S alcançados em função do modo de aeração, para as diferentes taxas de aeração estudadas.

Gráfico 2 - Comparação da taxa de circulação de sólidos em função do modo de aeração

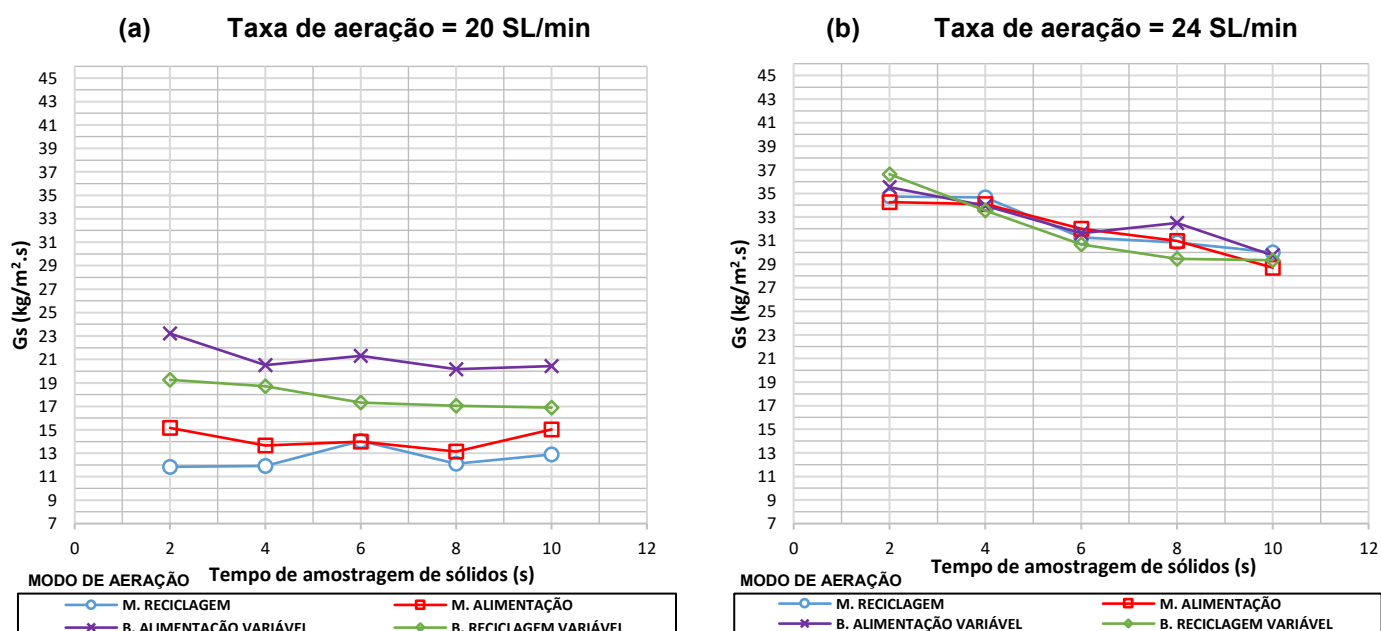
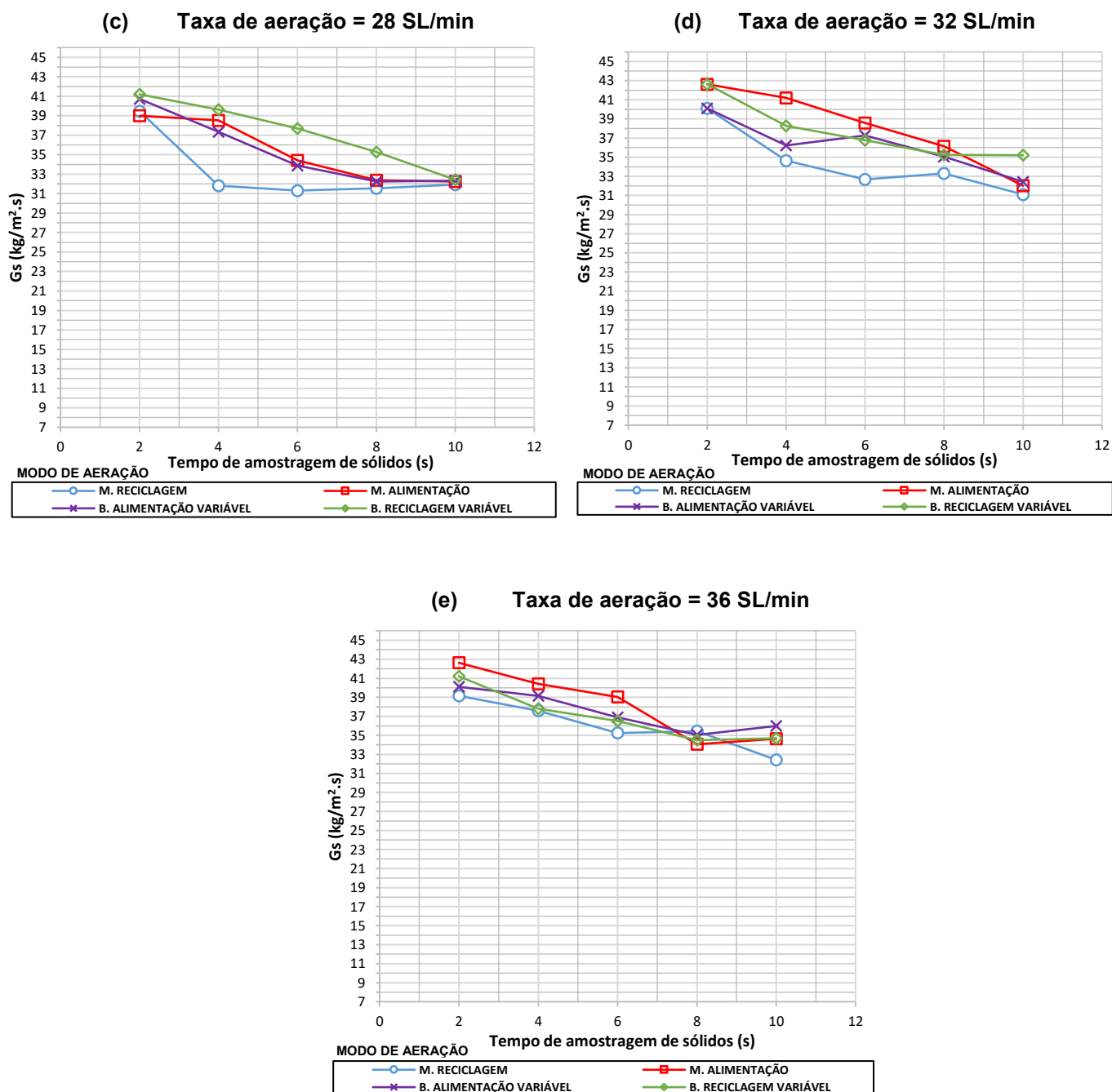


Gráfico 2 - Comparação da taxa de circulação de sólidos em função do modo de aeração (continuação)



Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que, quando utilizada a taxa de aeração mínima de 20 SL/min (Gráfico 2(a)), os modos de aeração monocâmara promoveram menores valores de G_s que os realizados com aeração bicâmara. Nesta taxa de aeração, o modo de aeração monocâmara com injeção na câmara de reciclagem levou aos valores

mínimos de G_S , sugerindo que este modo apresenta maior dificuldade de arrastar sólidos da *loop-seal* em baixa taxa de aeração.

Já, no Gráfico 2, no qual utilizaram-se taxas de aeração de 24 SL/min a 36 SL/min, os valores de G_S foram muito semelhantes para todos os modos de aeração. Nota-se, no entanto, que o modo de aeração monocâmara com injeção de ar apenas na câmara de alimentação recupera o potencial de transporte de sólidos com o aumento da taxa de aeração, chegando a atingir a melhor capacidade de G_S entre todos os modos implementados na *loop-seal*. Um comportamento similar não foi observado para o modo de aeração monocâmara com injeção de ar apenas na câmara de reciclagem, uma vez que a capacidade de transporte das partículas se manteve quase sempre no menor valor nas taxas de aeração testadas.

Por outro lado, uma melhor equalização nos valores de G_S foi observada quando comparados os dois modos de aeração bicâmara utilizados, nos quais a mudança na capacidade de transporte de sólidos não teve uma tendência claramente definida. Tal situação sugere, portanto, a maior robustez (predictibilidade) fornecida pelo modo de aeração bicâmara em relação ao modo de aeração monocâmara, quando da escolha pela forma de dividir a taxa total de ar injetada na válvula *loop-seal*.

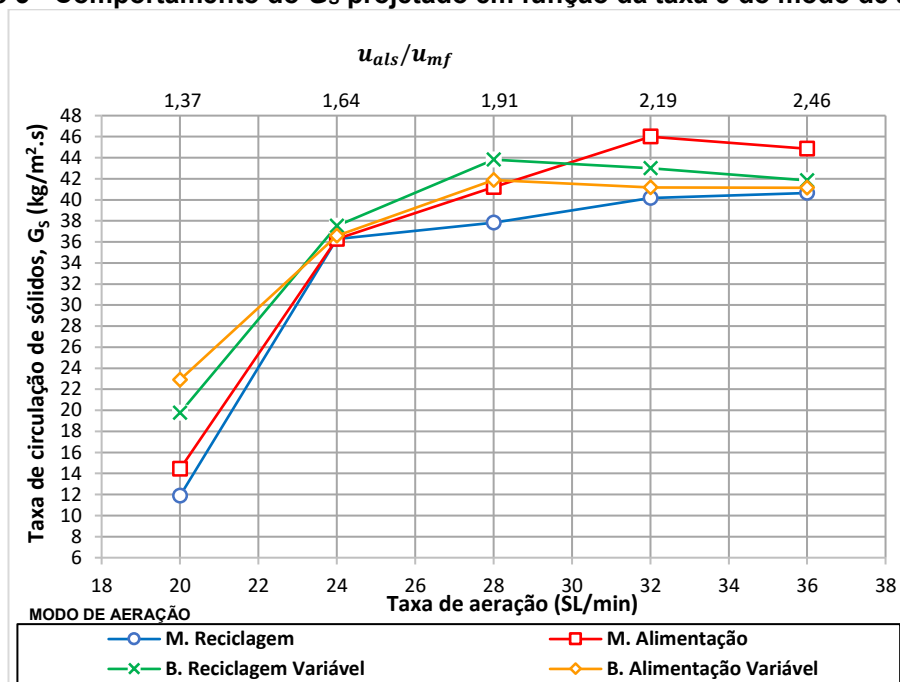
Uma vez que o tempo de amostragem influencia no valor do G_S obtido devido à natureza intrusiva do método de medição, a estimativa da taxa real de circulação de sólidos foi realizada considerando a projeção linear dos pontos medidos nos períodos de amostragem de 2 a 10 segundos para o tempo de amostragem nulo. Dessa forma, na hipótese da não alteração do inventário de sólidos no LFC, a medida do G_S torna-se independente do período da coleta. Assim, as análises realizadas a partir da seção 4.2 consideram já os valores de G_S projetados em cada situação como sendo o valor real da taxa de circulação de sólidos objeto de comparação.

4.2 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NA TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS (G_S)

O Gráfico 3 apresenta o comportamento do valor de G_S projetado (calculado conforme descrito na seção 4.1) em função da taxa e do modo de aeração. Este gráfico é também expresso em termos do número de fluidização equivalente aplicado

na válvula *loop-seal* em cada taxa de aeração, a fim de poder comparar os resultados com os dados da literatura. O número de fluidização é igual à razão entre a velocidade superficial do gás imposta pela taxa de aeração injetada na *loop-seal* (u_{als}) e a velocidade de mínima de fluidização das partículas (u_{mf}).

Gráfico 3 - Comportamento do G_s projetado em função da taxa e do modo de aeração



Fonte: Autoria própria.

No Gráfico 3 observa-se que, em todos os modos de aeração, o G_s aumentou com o acréscimo do número de fluidização. Para ambos os modos de aeração bicâmara, a variação crescente no valor de G_s foi drasticamente restringida quando a taxa de aeração ficou próxima de 28 SL/min, marcando ainda o início de um decaimento no valor de G_s com o incremento da taxa de aeração. No caso da aeração monocâmara, com injeção de ar apenas na câmara de alimentação, a variação crescente prolongou-se até uma taxa aproximada de aeração de 32 SL/min, enquanto que, no caso da injeção de ar apenas na câmara de reciclagem, a queda na taxa de variação do G_s foi antecipada na vazão volumétrica de 24 SL/min. Nota-se também que, para a taxa de aeração mínima de 20 SL/min, o modo de aeração bicâmara com aeração variável na câmara de reciclagem conduziu para a obtenção de um maior valor de G_s , sugerindo este modo de aeração como o mais efetivo para promover

circulação de sólidos a baixa taxa de aeração. No entanto, percebe-se que este modo foi o de menor variação de G_S com taxa de aeração, limitando mais o potencial de controle da circulação de partículas. Já, para a maior taxa de aeração testada, a aeração monocâmara com injeção de ar apenas na câmara de alimentação forneceu o melhor rendimento em termos de G_S .

Mantendo-se fixa a aeração na parte inferior das câmaras de alimentação e de reciclagem, Kim e Kim (2001) analisaram o efeito da taxa de aeração vertical na câmara de alimentação, com diferentes diâmetros de partículas. Os autores identificaram um aumento aproximadamente linear do G_S até alcançar a sua estabilização em determinado valor da taxa de aeração vertical. Esse mesmo comportamento foi verificado por Yao *et al.* (2010), os quais encontraram um valor crítico de aeração para G_S máximo. Os autores indicaram que, quando a taxa de aeração é maior que a taxa de aeração crítica, o G_S torna-se constante devido ao aparecimento do excesso de bolhas no *standpipe*, causando instabilidade no circuito de fluidização. Li *et al.* (2014) verificaram o mesmo comportamento do G_S em função da aeração ao investigar o efeito da injeção de ar na base da câmara de reciclagem de uma válvula *loop-seal*.

O comportamento encontrado do G_S em relação à taxa de aeração injetada na *loop-seal*, tanto neste trabalho como nas pesquisas anteriormente citadas, pode se explicar pelo aumento da porosidade do leito na região da válvula na presença de maior quantidade de ar, o que ajuda a aliviar as forças existentes partícula-partícula e parede-partícula, facilitando a movimentação dos sólidos na presença de gradientes de pressão.

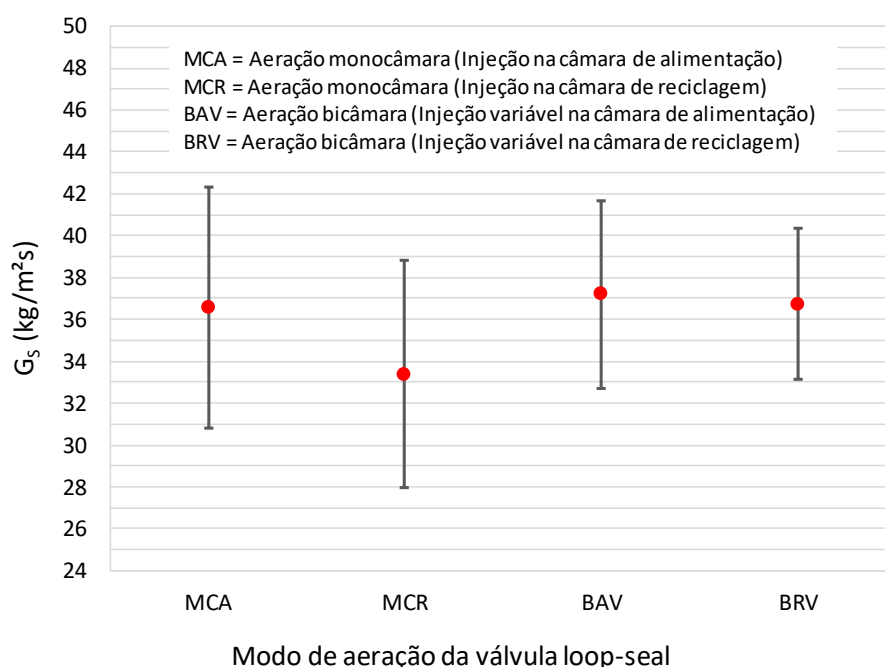
Wang *et al.* (2014) avaliaram o desempenho das válvulas *loop-seal* do tipo “U” e “N” no fluxo gás-sólido de um sistema de LFC. No caso específico da válvula do tipo “U”, igual à usada na presente dissertação, a aeração foi feita na parte inferior das câmaras de alimentação e de reciclagem. Os autores conseguiram obter o transporte de sólidos pela *loop-seal* utilizando números de fluidização (u_{als}/u_{mf}) de 3,5 a 7,0, com valor máximo de G_S acontecendo no número de fluidização próximo a 6,5. A faixa de número de fluidização de operação estável foi de 6,0 a 7,0, com valor máximo de G_S acontecendo perto de 90 kg/m².s na maioria dos modos de aeração analisados.

Utilizando o modo de aeração bicâmara, variando a taxa aeração na câmara de reciclagem e mantendo fixa a taxa de aeração na câmara de alimentação, Li *et al.* (2017) observaram um pequeno acréscimo de G_S com o aumento da taxa de aeração.

Tal resultado reivindica o comportamento encontrado no presente trabalho, uma vez que esse modo de aeração mostrou ter a menor faixa de controle do G_S de todos os modos de aeração testados.

Uma análise de variância foi realizada ao nível de significância (α) de 5% para verificar a presença de variações significativas no valor médio do G_S entre os quatro modos de aeração da *loop-seal* dentro da faixa da taxa de aeração analisada. Os cálculos foram realizados no *software* Excel™, função análise de dados, com ANOVA de fator duplo sem repetição. O resultado dos valores médios de G_S , incluindo o erro padrão na faixa da taxa de aeração, é apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Valores médios de G_S em função do modo de aeração



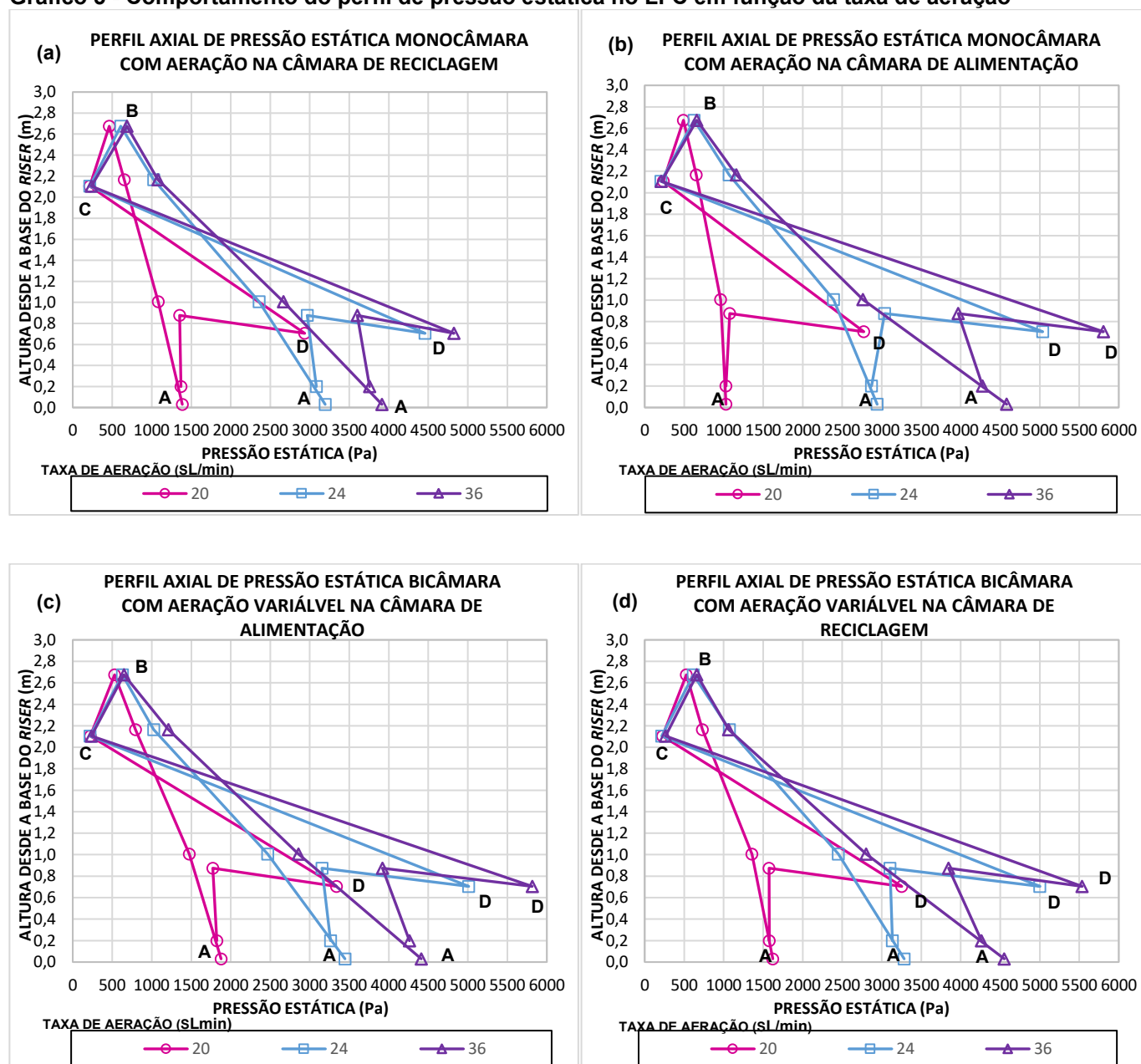
Fonte: Autoria própria.

O resultado da análise estatística sugere que o modo de aeração não teve influência significativa ao nível de confiança de 95% no valor médio de G_S , uma vez que o valor da probabilidade de significância “p-valor” foi de 0,1259.

4.3 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NO PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA AXIAL

Os resultados do efeito da taxa de aeração em relação ao perfil de pressão estática axial no LFC foram obtidos para os modos de aeração monocâmara e bicâmara, sendo estes apresentados no Gráfico 5. O perfil de pressão foi obtido à partir de medidas em diferentes pontos do sistema, representadas por (A-B) o *riser*, *standpipe* (C) e válvula *loop-seal* (D).

Gráfico 5 - Comportamento do perfil de pressão estática no LFC em função da taxa de aeração



Fonte: Autoria própria.

As curvas do Gráfico 5 confirmam perfis típicos de pressão estática para um leito fluidizado circulante operando com válvula *loop-seal*, previamente apresentados por Kim e Kim (2002) e Wang *et al.* (2014). Nos Gráfico 5(a) a 5(d) observa-se que ao aumentar a taxa de aeração, todos os valores de pressão crescem, o que pode ser explicado pelo aumento do atrito causado pelo crescimento no trânsito de partículas (G_s) e pelo ajuste do balanço de pressão, ocasionado principalmente pelo aumento do diferencial de pressão entre o *standpipe* e a válvula *loop-seal* (trajeto C-D). Ainda, verifica-se que a pressão na região inferior do *riser* também cresce, com aumento pouco expressivo na parte superior da coluna. Tal comportamento é explicado pela variação axial típica da porosidade do leito no interior deste componente, exibindo uma diminuição gradativa na concentração axial de sólidos, da base até o topo.

Uma vez que o aumento na taxa de aeração gera uma nova condição de circulação de partículas, o maior fluxo de sólidos em trânsito pela região do *riser* impacta na localização axial do ponto de inflexão da transição da região densa para a região diluída. O ponto de inflexão que separa estas duas zonas desloca-se para cima, aumentando a distância da porção de sólidos em fase densa em detrimento de uma mais curta região diluída.

Na região superior do *standpipe* (Ponto C), o aumento na taxa de aeração não se refletiu em maior pressão estática, o que é coerente com a não presença de leito nesse local. No entanto, mais abaixo, na região da válvula *loop-seal*, houve um aumento considerável no valor da pressão estática, como consequência da alta concentração de leito nessa região e maior tendência das partículas a serem suportadas pelo ar à medida que mais gás é injetado na base da válvula, incrementando-se a pressão estática.

Os Gráfico 6(a) e 6(b), mostram o comportamento do perfil de pressão estática axial em função dos modos de aeração monocâmara e bicâmara, nas taxas de aeração de 20 SL/min e 24SL/mim, respectivamente. Pode-se observar que não houve alteração na pressão na parte superior do *riser* e do *standpipe*. A pressão na parte inferior do *riser* e na válvula *loop-seal* foi maior para ambos os modos de aeração bicâmara.

Nos Gráfico 6(c) a 6(e), com as respectivas taxas de aeração de 28 SL/min, 32 SL/min e 36 SL/min, demonstra-se que os perfis axiais de pressão são muitos semelhantes em todos os modos de aeração, com exceção do modo de aeração

monocâmara com injeção na câmara de reciclagem, na qual obtiveram-se pressões menores na parte inferior do *riser* e na válvula *loop-seal*.

Gráfico 6 - Comportamento do perfil de pressão estática no LFC em função do modo de aeração

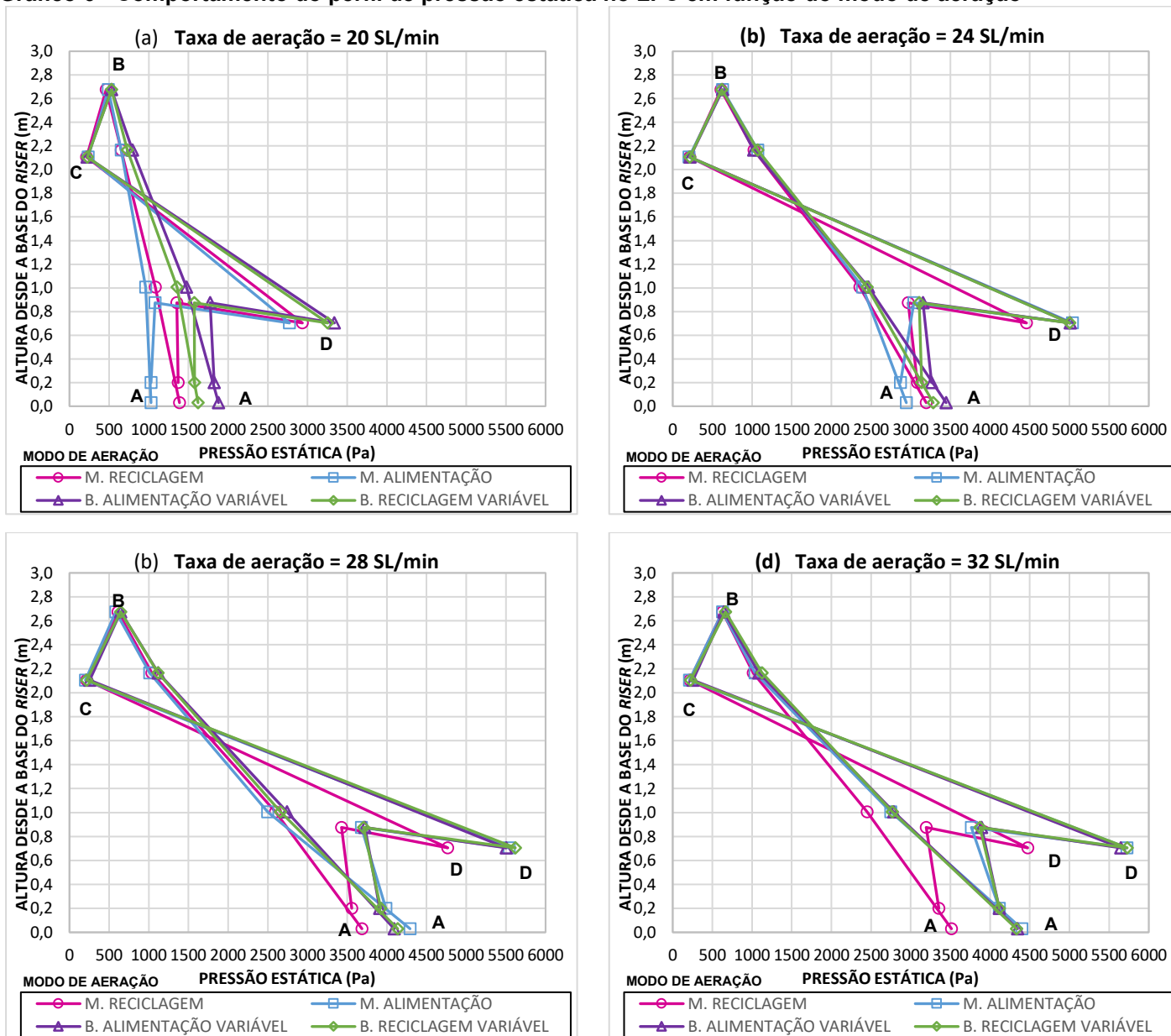
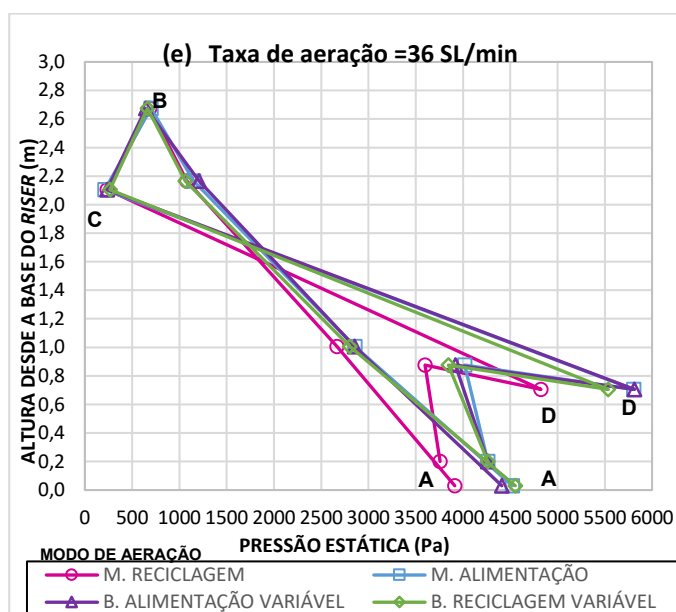


Gráfico 6 - Comportamento do perfil de pressão estática no LFC em função do modo de aeração (Continuação)



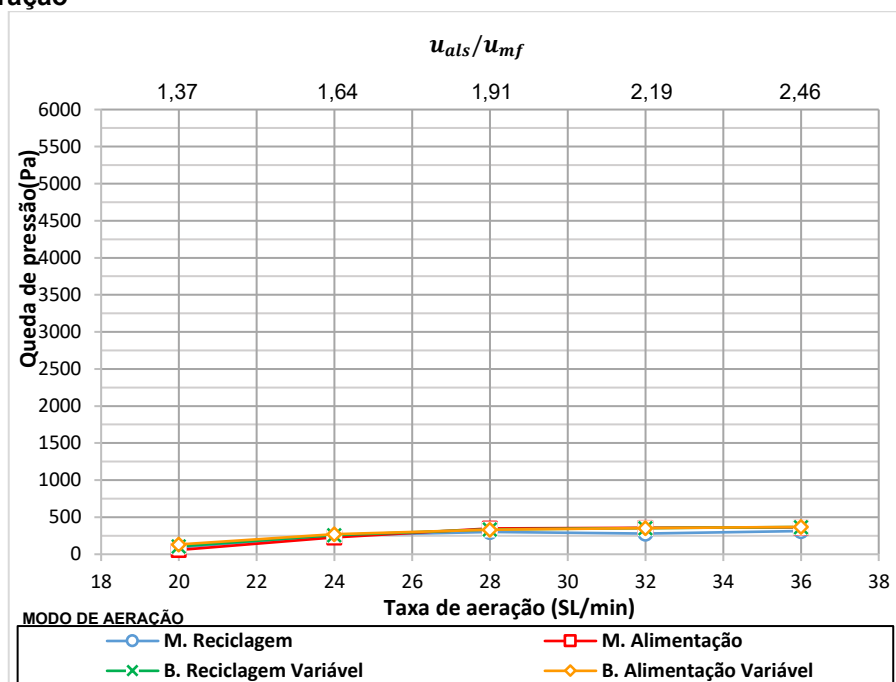
Uma análise mais detalhada sobre o comportamento do perfil de pressão estática do LFC pode ser realizada em termos da perda de pressão experimentada em cada um dos componentes principais do sistema. Essa discussão é apresentada na seção 4.4.

4.4 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NA QUEDA DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DO LFC

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a queda de pressão em cada componente do sistema de leito fluidizado circulante em função da taxa e do modo de aeração. A queda de pressão foi obtida pela diferença das pressões estáticas registradas pelos manômetros de coluna nas regiões delimitadas por cada componente, conforme indicado na Figura 14(b).

O Gráfico 7 ilustra o efeito da taxa de aeração na queda de pressão experimentada pela coluna *riser*.

Gráfico 7 - Comportamento da queda de pressão no riser em relação à taxa e modo de aeração



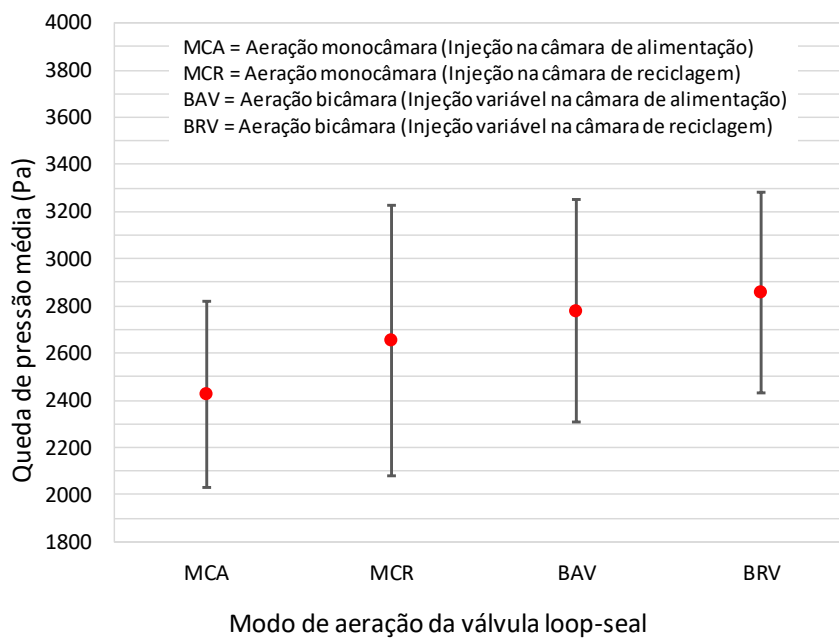
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que, para todos os modos de aeração, a queda de pressão no riser aumentou com o acréscimo de taxa da injeção de ar na válvula *loop-seal*. O aumento na queda de pressão foi mais acentuado no início da faixa da taxa de aeração, estabilizando-se a partir de números de fluidização próximos a 2 na válvula de recirculação de sólidos. Uma vez que a velocidade de fluidização no riser foi mantida constante, o aumento na queda de pressão neste componente com o incremento na taxa de aeração deve ser atribuído principalmente ao crescimento da fração média de sólidos na coluna principal de fluidização (BASU E CHENG, 2000), o que se comprova pelo aumento gradativo na taxa de circulação de partículas (G_s) já verificada no Gráfico 3. Conforme Basu e Cheng (2000), uma parcela da queda de pressão deverá ser atribuída também ao atrito das partículas na coluna e à aceleração das mesmas, as quais crescem proporcionalmente com o valor de G_s . O aumento na queda de pressão no riser com o acréscimo da taxa de aeração também é mencionada nos trabalhos apresentados por Yao *et al.* (2010) e Dieter *et al.* (2013), embora estes tenham utilizado aeração apenas na câmara de alimentação da válvula *loop-seal*.

Adicionalmente, do Gráfico 7 observa-se que o modo de aeração monocâmara com aeração apenas na câmara de reciclagem forneceu uma queda de pressão menor que no resto dos outros modos de aeração estudados. No entanto, para verificar se essa variação foi significativa ao nível de confiança de 95%, foi realizada

uma análise de variância para a queda de pressão no *riser*. Os valores das médias da queda de pressão no *riser*, incluindo o erro padrão na faixa da taxa de aeração, são apresentados no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Valores médios da queda de pressão no *riser* em função do modo de aeração

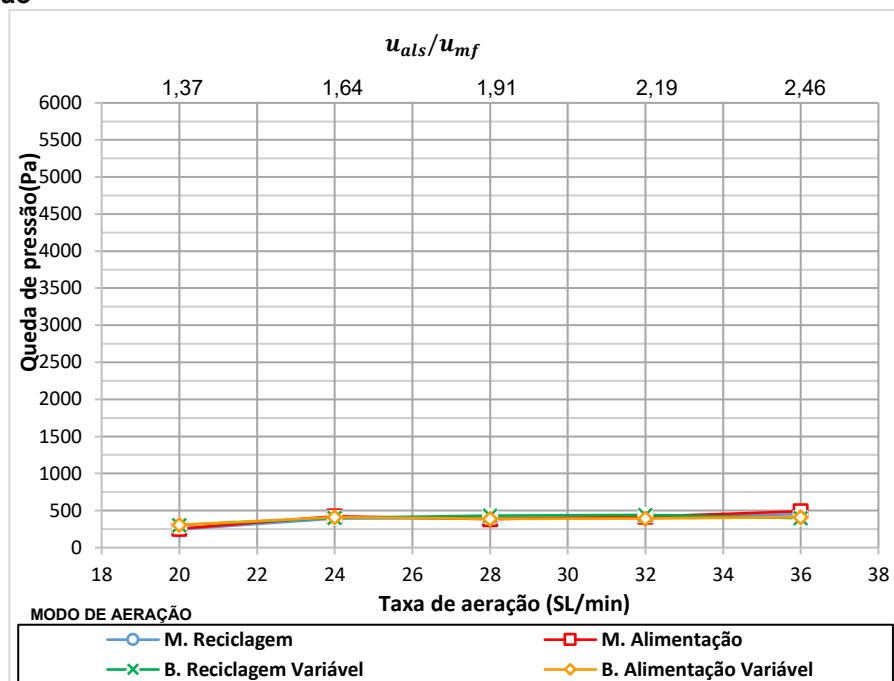


Fonte: Autoria própria.

O resultado da análise de variância mostrou um p-valor igual a 0,04035, sugerindo que o modo de aeração aplicado a uma válvula *loop-seal* do tipo “U” pode trazer mudanças significativas na queda de pressão promovida no *riser*, mesmo que não exista um efeito significativo sobre a variação de G_S nesse mesmo nível de confiança.

O Gráfico 9 mostra o comportamento da queda de pressão no ciclone em função da taxa e do modo de aeração. Pode-se observar a presença de um maior acréscimo na queda de pressão para a faixa de u_{als}/u_{mf} entre 1,37 e 1,64, com pouca alteração dos perfis a maiores taxas de aeração, devido à menor variação no transporte dos sólidos (estabilização do G_S).

Gráfico 9 - Comportamento da queda de pressão no ciclone em relação à taxa e modo de aeração

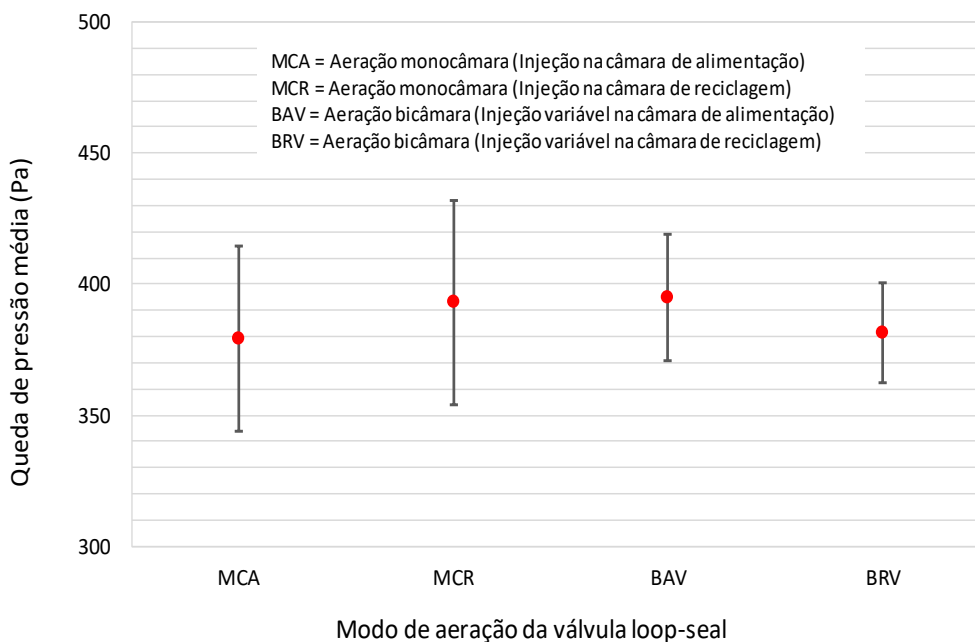


Fonte: Autoria própria.

Estes resultados estão em concordância com os apresentados por Yao *et al.* (2010), que observaram queda de pressão constante no ciclone com o aumento da taxa de aeração na câmara de alimentação. Ainda, Wang *et al.* (2014), encontraram que a queda de pressão no ciclone é inalterada em uma ampla faixa do número de fluidização para válvulas *loop-seal* dos tipos “U” e “N”.

O Gráfico 10 apresenta os valores médios da queda de pressão e o erro padrão na faixa da taxa de aeração, para os modos de aeração estudados.

Gráfico 10 - Valores médios da queda de pressão no ciclone em função do modo de aeração

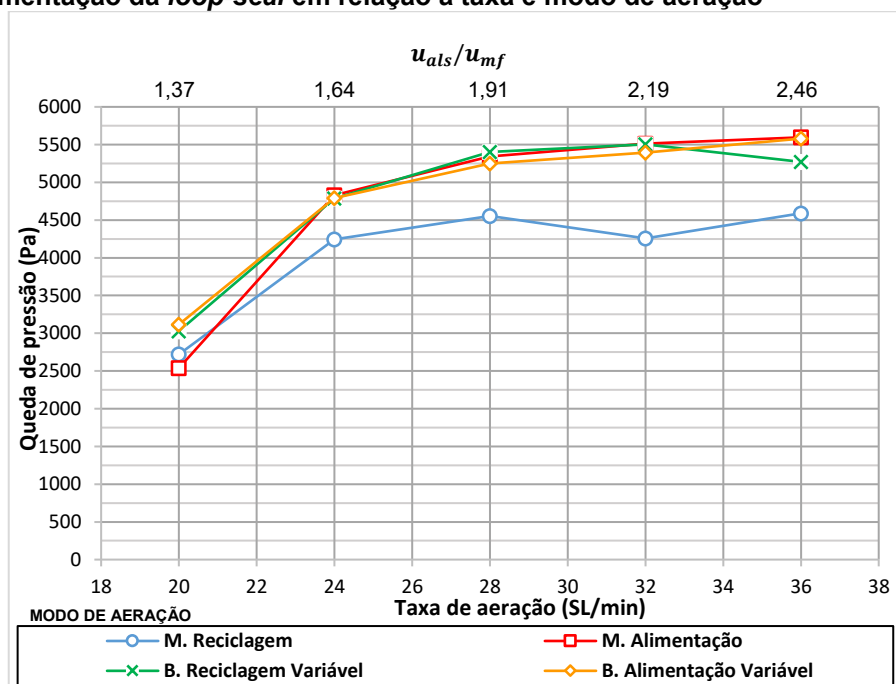


Fonte: Autoria própria.

A análise de variância demonstra que não há efeito significativo produzido pelos modos de aeração sobre a queda de pressão no ciclone para o nível de confiança de 95%, uma vez que o p-valor alcançado foi de 0,7850.

O comportamento da queda de pressão na região do *standpipe* e câmara de alimentação da válvula loop-seal em função da taxa e do modo de aeração é ilustrado no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Comportamento da queda de pressão no *standpipe* e câmara de alimentação da *loop-seal* em relação à taxa e modo de aeração



Fonte: Autoria própria.

A queda de pressão no *standpipe* e na câmara de alimentação teve um comportamento similar ao registrado na região da coluna *riser*, aumentando com o crescimento do valor da taxa de aeração. Este resultado está em concordância com as observações de Dieter *et al.* (2013) e Yao *et al.* (2010). No entanto, para essa região do LFC, o modo de aeração monocâmara, com aeração na câmara de reciclagem promoveu uma maior discrepância em termos de queda de pressão em relação à dos outros modos de aeração. A explicação desse comportamento atribui-se ao aumento da sensibilidade da queda de pressão com o valor de G_s nessa região do LFC, promovida pela presença de um leito empacotado em movimento, onde o atrito partícula-partícula e partícula-parede ganha importância.

De acordo com Kunni e Levenspiel (1991), a queda de pressão na região do *standpipe* e da câmara de alimentação de uma válvula *loop-seal* é afetada pelo atrito decorrente da taxa de circulação de sólidos, bem como pela variação do arraste gás-sólido induzida pela mudança na velocidade de deslizamento fluido-partícula (u_{sl}) atravessando um leito móvel poroso, conforme estabelecido pela Equação de Ergun modificada (Equação (9)):

$$\frac{\Delta P_{SP}}{H_{SP}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu u_{sl}}{\varepsilon^2 (\phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_g u_{sl}^2}{\varepsilon (\phi d_p)} \quad (9)$$

Onde:

ΔP_{SP} é a queda de pressão no *standpipe*;

H_{SP} altura de sólidos no *standpipe*;

ρ_g densidade do gás;

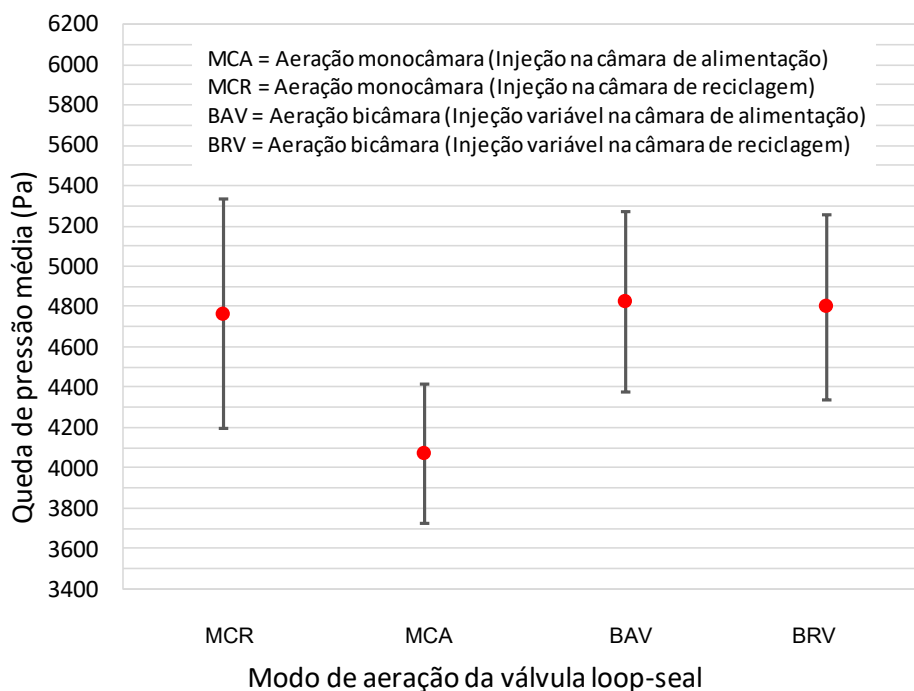
d_p diâmetro da partícula;

μ viscosidade dinâmica do ar.

Yao *et al.* (2010), perceberam que ao aumentar a taxa de aeração, a queda de pressão no *standpipe* cresce até o aparecimento de bolhas na presença de uma altura de leito móvel decrescente. De acordo com os autores, a vazão e a direção do fluxo de gás no tubo vertical influenciam diretamente a velocidade de deslizamento gás-sólido e, portanto, a queda de pressão no *standpipe*.

O Gráfico 12 apresenta o valor das médias da queda de pressão no conjunto *standpipe* e câmara de alimentação da *loop-seal* e o erro padrão na faixa da taxa de aeração, considerando-se os modos de aeração testados.

Gráfico 12 - Valores médios da queda de pressão no *standpipe* e câmara de alimentação da *loop-seal* em função do modo de aeração

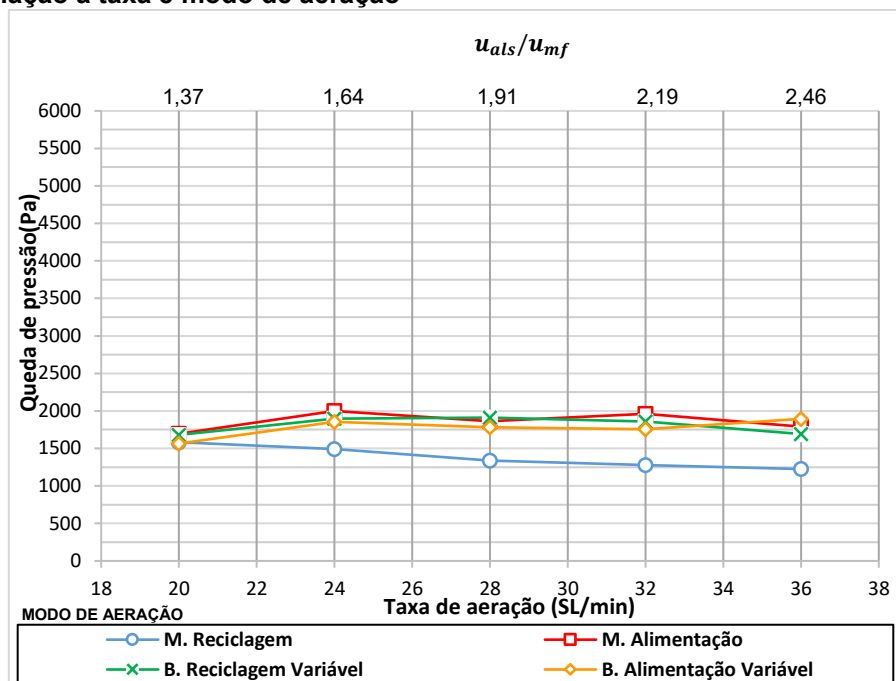


Fonte: Autoria própria.

O p-valor de 0,000943 obtido da análise de variância indica que o modo de aeração leva a diferenças significativas na queda de pressão experimentada pela região conjunta do *standpipe* e da câmara de alimentação da válvula *loop-seal*, em nível de confiança superior a 95%.

O Gráfico 13 ilustra o comportamento da queda de pressão na região da câmara de reciclagem em função da taxa e do modo de aeração.

Gráfico 13 - Comportamento da queda de pressão na câmara de reciclagem da *loop-seal* em relação à taxa e modo de aeração



Fonte: Autoria própria.

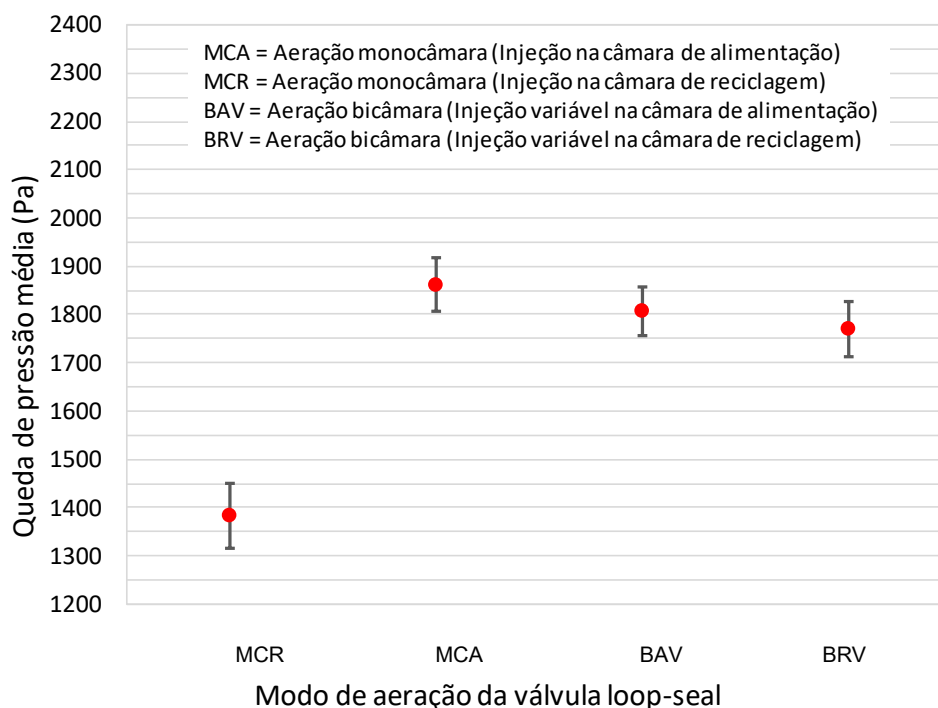
Exceto para o caso de aeração monocâmara com injeção de ar na câmara de reciclagem, a queda de pressão na região da câmara de reciclagem permaneceu quase constante, com leve aumento apenas no início da faixa da taxa de aeração. Para esses modos de aeração, o resultado obtido sugere que a diminuição na queda de pressão hidrostática ocasionada pelo aumento da fração gasosa no leito fluidizado da câmara de reciclagem é balanceada com o aumento na queda de pressão produzida pela elevação do atrito durante uma maior passagem de sólidos ou G_s .

No caso particular da aeração monocâmara com injeção de ar apenas na câmara de reciclagem, o perfil decrescente seria consequência da diminuição na queda de pressão ocasionada pela formação de bolhas no lado da câmara de reciclagem, sendo esse feito dominante em relação ao do aumento promovido pelo incremento no valor de G_s .

Para Kim e Kim (2002), a queda de pressão na câmara da reciclagem depende apenas da porosidade do leito. No entanto, para Li *et al.* (2014), que utilizaram aeração apenas na câmara de reciclagem, a queda de pressão também depende da velocidade de deslizamento gás-sólido, da força gravitacional exercida sobre os sólidos, do atrito com as paredes e da aceleração das partículas.

O Gráfico 14 apresenta o valor das médias da queda de pressão na câmara de reciclagem da *loop-seal*, bem como o erro padrão na faixa da taxa de aeração, considerando os modos de aeração estudados.

Gráfico 14 - Valores médios da queda de pressão na câmara de reciclagem da *loop-seal* em função do modo de aeração



Fonte: Autoria própria.

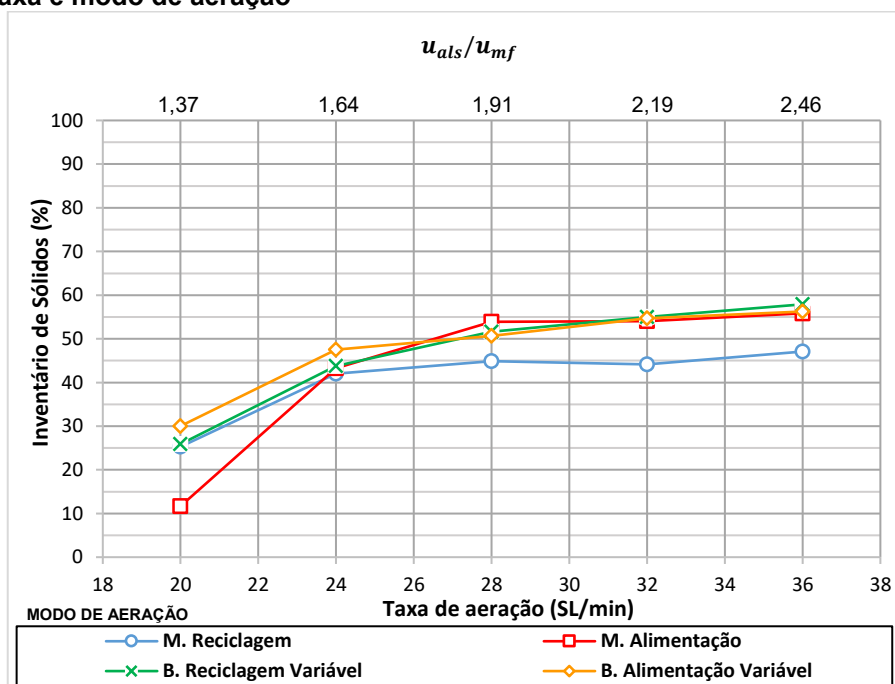
O p-valor de 0,000212 obtido da análise de variância indica que o modo de aeração leva a diferenças significativas na queda de pressão experimentada pela câmara de reciclagem da válvula *loop-seal*, em nível de confiança superior a 95%.

4.5 EFEITO DA TAXA E DO MODO DE AERAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DO INVENTÁRIO DE SÓLIDOS

Os resultados da distribuição do inventário de sólidos no LFC foram obtidos mediante manobra realizada sobre o LFC justo antes do término de cada de teste. Esta manobra consistiu em interromper abruptamente e, de maneira simultânea, a passagem de ar de fluidização no *riser* e a aeração na *loop-seal*, obrigando os sólidos a permanecerem na região no qual se encontravam antes da interrupção da operação do LFC.

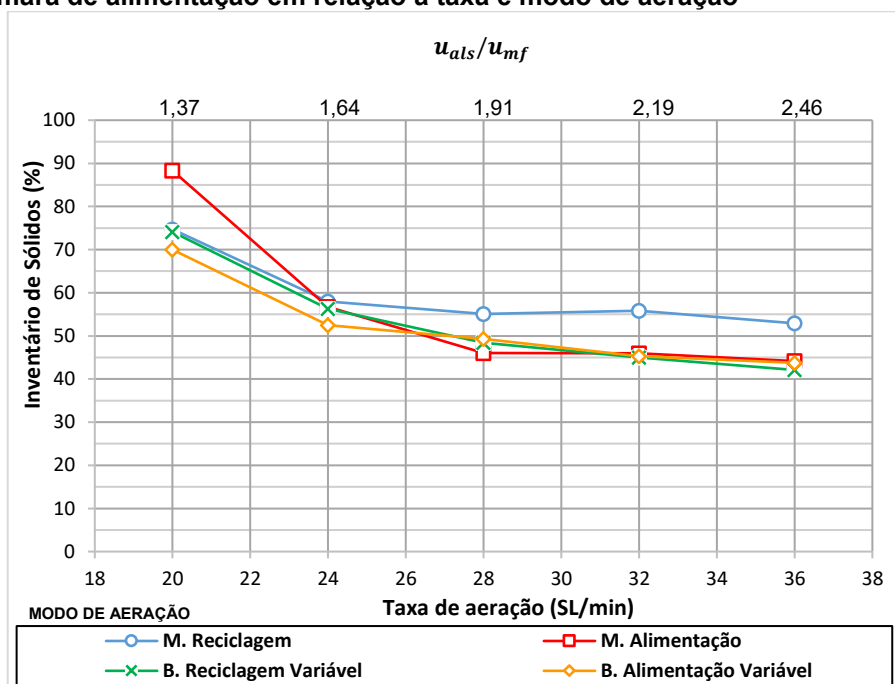
O efeito da taxa e do modo de aeração sobre a distribuição do inventário de sólidos no *riser* e no conjunto *standpipe/loop-seal* está ilustrado nos Gráfico 15 e Gráfico 16, respectivamente. Como se observa no Gráfico 15, a região do *riser* opera com massa crescente de sólidos à medida que aumenta a taxa da aeração na *loop-seal*, podendo variar entre 10% a quase 60% do inventário total (I_t) do LFC na faixa de aeração testada. Como esperado, perfis invertidos apresentados no Gráfico 15 foram obtidos para o inventário de sólidos remanescente na região conjunta formada pelo *standpipe* e a câmara de alimentação (Gráfico 16). Tais resultados confirmam os comportamentos já analisados do G_S e das quedas de pressão medidas nos principais componentes do LFC.

Gráfico 15 - Comportamento do inventário remanescente de sólidos no *riser* em relação à taxa e modo de aeração



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 16 - Comportamento do inventário remanescente de sólidos no *standpipe* e na câmara de alimentação em relação à taxa e modo de aeração

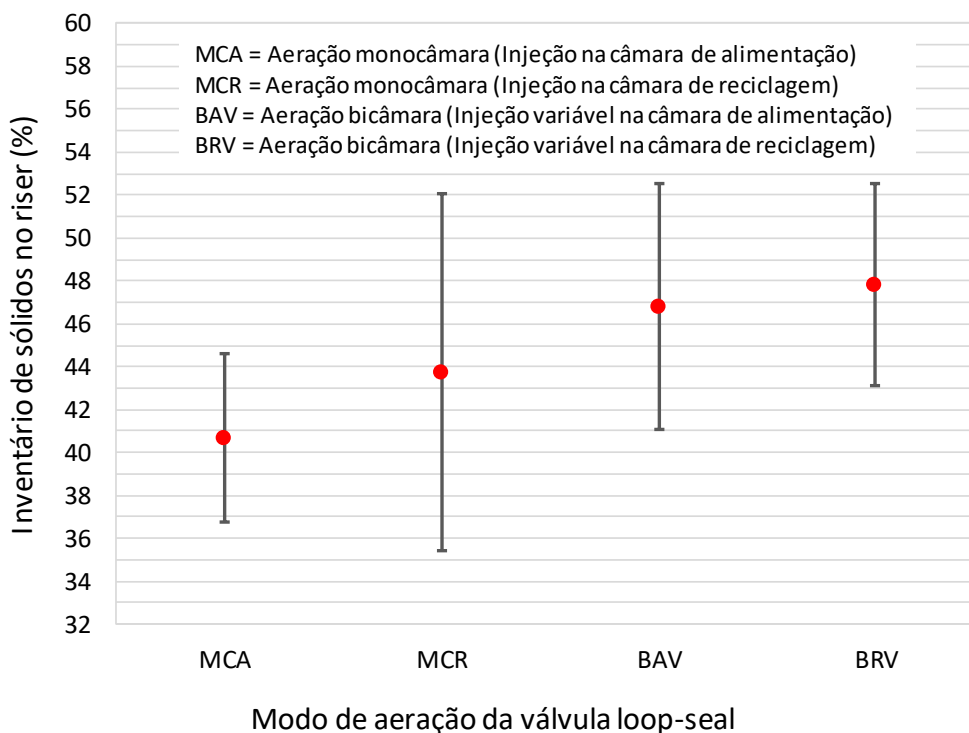


Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que, para os modos de aeração bicâmara e para o modo de aeração monocâmara com aeração na câmara de reciclagem, o comportamento da distribuição do inventário de sólidos é semelhante.

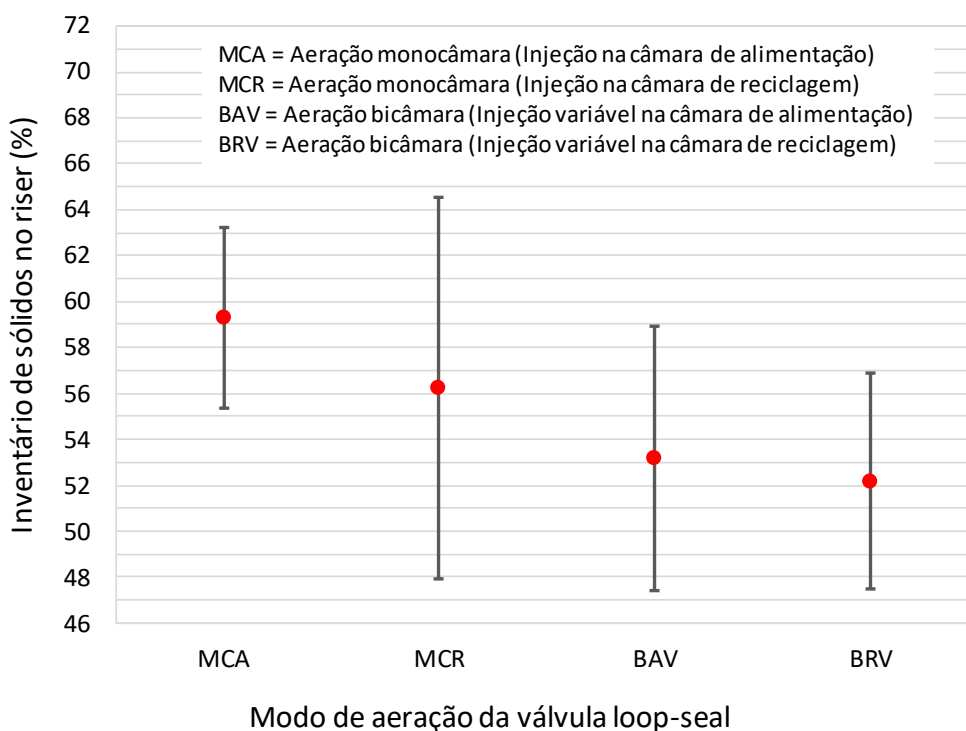
Com aeração realizada somente na câmara de reciclagem, a presença da massa de sólidos no *riser* pareceu menor comparado aos dos outros modos de aeração. Os valores das médias e o erro padrão na faixa da taxa de aeração para a distribuição de inventário, tanto na região do *riser*, quanto no conjunto *standpipe/loop-seal*, são apresentados nos Gráfico 17 e Gráfico 18, respectivamente.

Gráfico 17 - Valores médios do inventário de sólidos remanescente no riser em função do modo de aeração



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 18 - Valores médios do inventário de sólidos remanescente no standpipe e loop-seal em função do modo de aeração



Fonte: Autoria própria.

Conforme resultado da análise de variância, o modo de aeração não tem efeito significativo ao nível de confiança de 95% sobre a distribuição do inventário em ambas as regiões do LFC, uma vez que o p-valor foi igual a 0,1069.

4.6 RELAÇÃO ENTRE TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS E QUEDA DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DO LFC

A relação entre G_s e a queda de pressão nos componentes do sistema de leito fluidizado circulante é apresentada nos Gráfico 19(a) a Gráfico 19(d). Todos os perfis mostraram que existe uma correlação quase linear entre a taxa de circulação de sólidos e as respectivas quedas de pressão.

Gráfico 19 - Relação entre G_s e a queda de pressão nos componentes do sistema de LFC

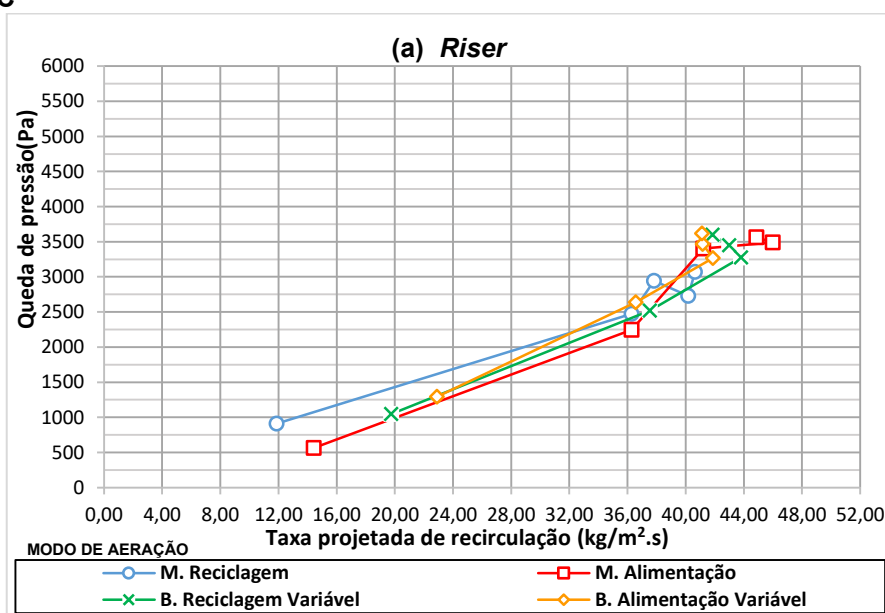


Gráfico 19 – Relação entre G_s e a queda de pressão nos componentes do sistema de LFC (Continuação)

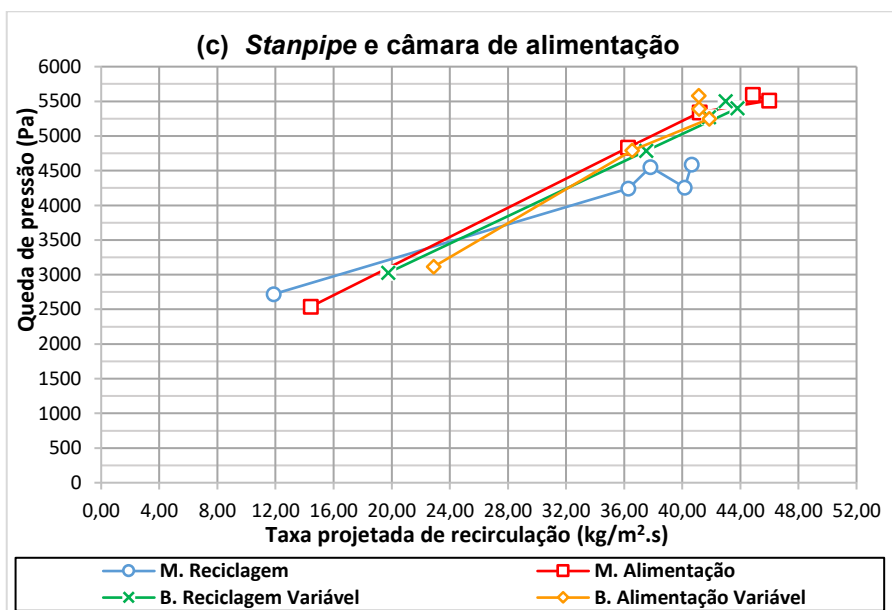
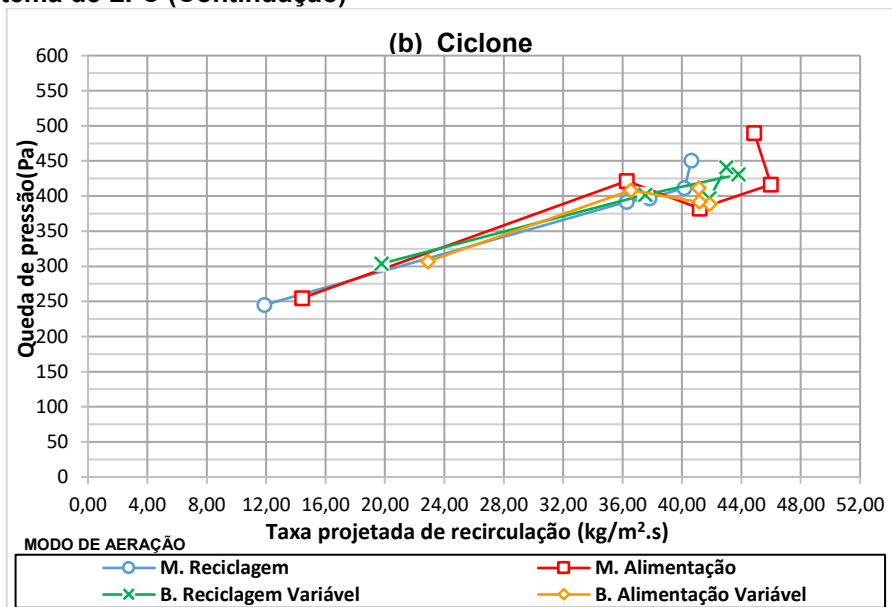
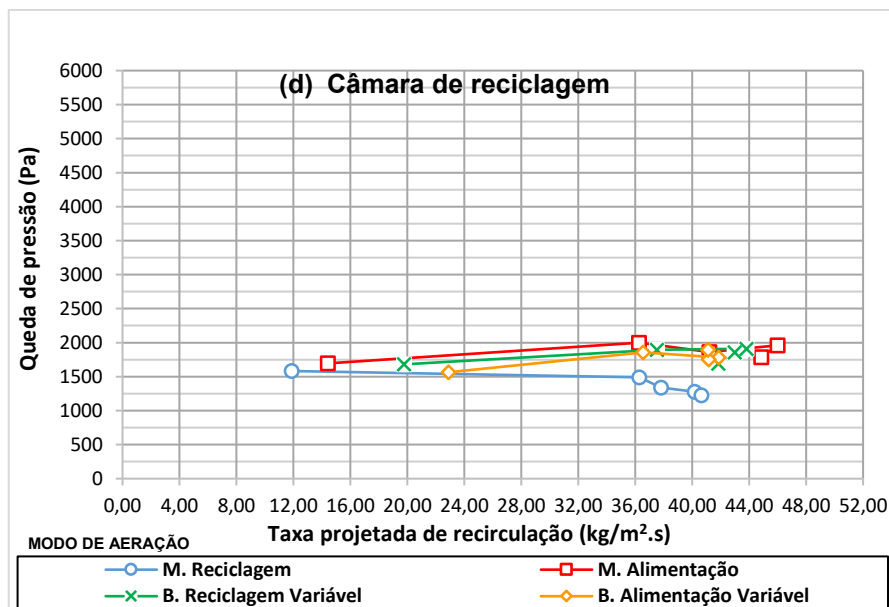


Gráfico 19 - Relação entre G_S e a queda de pressão nos componentes do sistema de LFC (Continuação)



Fonte: Autoria própria.

Dos perfis obtidos verifica-se que as maiores quedas de pressão em função de G_S acontecem no conjunto *standpipe/loop-seal*, seguido em importância pela região do *riser*. Este resultado é consequência da maior densidade de leito presente na região do *standpipe* e da câmara de alimentação da *loop-seal*. Já, no ciclone, a queda de pressão foi praticamente independente da taxa de circulação de sólidos, comparando os modos de aeração.

Por outro lado, a queda de pressão na câmara de reciclagem teve um leve aumento com o incremento de G_S , excetuando o modo de aeração monocâmara com aeração na câmara de reciclagem, na qual aconteceu um decréscimo da queda de pressão. Quando se utiliza esse modo de aeração, promove-se uma menor resistência para a passagem do ar, fluidizando mais facilmente as partículas da câmara de reciclagem e aumentando a porosidade do leito, com a consequentemente redução na queda de pressão.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da pesquisa realizada foi possível verificar que o amostrador de sólidos proposto e instalado no circuito de fluidização operou como esperado, sendo apropriado para medir valores de G_S entre $10 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ e $50 \text{ kg/m}^2.\text{s}$. Esta faixa da taxa de circulação de sólidos indica que as condições operacionais testadas na UFRAF podem ser aplicadas em processos de combustão e gaseificação em LFC. Mesmo sendo um equipamento intrusivo, que afeta a própria variável durante a medição, o erro da amostragem com válvulas do tipo divergente pode ser reduzido extrapolando os resultados de G_S coletados em períodos determinados para o tempo de coleta nulo.

O perfil de G_S mostrou-se crescente e assintótico em relação à taxa de aeração aplicada na válvula *loop-seal*. No entanto, em relação ao modo de aeração, a análise estatística mostrou que ele não afeta o valor médio do G_S dentro da faixa aproximada de 1,4 a 2,5 no número de fluidização da aeração. O comportamento assintótico de G_S com a taxa de aeração mostra que o controle da circulação dos sólidos se torna ineficaz a partir de certo valor, sendo esta regulagem conduzida pelo balanço de pressão no circuito do LFC.

O perfil axial de pressão estática ao longo do circuito acoplado à válvula *loop-seal* teve o mesmo formato reportado em trabalhos da literatura. O aumento na taxa de aeração refletiu em maiores pressões locais, como consequência da maior presença de sólidos em movimento e do ajuste automático do balanço de pressão.

Em geral, os diferentes modos de aeração estudados levaram a tendências similares no comportamento da queda de pressão em componentes, porém com alguns modos induzindo diferenças significativas. Foi observado que o efeito da variação da taxa e do modo de aeração na queda de pressão dos componentes está ligado à taxa de circulação de sólidos, à porosidade local do leito e às consequentes perdas por atrito. Nos componentes *riser* e no conjunto *standpipe*/câmara de alimentação, o modo de aeração originou diferenças significativas no aumento da queda de pressão. Já, na câmara de reciclagem, o efeito significativo foi oposto, com a queda de pressão diminuindo sob o modo de aeração monocâmara com injeção de ar na câmara de reciclagem. Esse efeito foi atribuído principalmente ao aumento da porosidade do leito nesta região do sistema de LFC. No ciclone, o modo de aeração não teve efeito na queda de pressão.

Os resultados obtidos também mostraram que o inventário de sólidos remanescente no conjunto *standpipe/loop-seal* diminui com o aumento da taxa de aeração, devido à maior transferência de sólidos em direção ao *riser* incentivada pelo incremento da queda de pressão na região do *standpipe* e *loop-seal*. A análise de variância indicou, no entanto, que não há efeito significativo do modo de aeração sobre o inventário de sólidos remanescentes no *riser* e no conjunto *standpipe/loop-seal*.

Percebeu-se que a queda de pressão aumentou de forma aproximadamente linear com o incremento de G_S nos componentes do circuito, sendo essa relação mais acentuada na região do *standpipe* e *loop-seal* devido à maior quantidade de sólidos sendo transportados, aumentando o atrito entre as partículas e as paredes dos componentes. Já, na câmara de reciclagem, a queda de pressão diminui quando G_S aumenta, em virtude do efeito dominante trazido pelo acréscimo da porosidade do leito na câmara de reciclagem, em relação ao efeito contrário gerado pelo atrito com o aumento do G_S . No ciclone, a queda de pressão torna-se independente do G_S , comparando os modos de aeração.

Para complementar ou aprimorar os resultados obtidos no presente estudo, sugerem-se, como trabalhos futuros: a automatização do sistema de coleta dos dados, a fim de analisar também o comportamento das flutuações de pressão no LFC. Adicionalmente, recomenda-se a realização de um estudo similar com diferentes tamanhos de partícula, inventários de sólidos e velocidades de fluidização. Por último, sugere-se a realização de pesquisas sobre a operação da *loop-seal* com misturas de areia e outros materiais, tais como carvão e/ou biomassa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR ISO 5167-1: Medição de Vazão de Fluidos por meio de Instrumentos de Pressão – Parte 1: Placas de Orifícios, Bocais e Tubos de Venturi Instalados em Seção Transversal Circular de Conduitos Forçados, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT.NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.Rio de Janeiro, 2003.

BADER, R.; FINDLAY, J.; KNOWLTON, T.M. Gas /solids flow patterns in a 30.5-cm-diameter circulating fluidized bed. In: **Proceedings of the Second International Conference on Circulating Fluidized Beds**. 1988.

BARESHINO, P.; SOLIMENE, R.; CHIRONE, R; SALATINO, P. Gas and solid flow patterns in the loop-seal of a circulating fluidized bed. **Powder technology**, n. 274, p. 197-202, 2014.

BASU, P. Combustion and gasification in fluidized beds. Ed.Taylor & Francis, Boca Raton-U.S.A, p. 4, 2006.

BASU, P.; BUTLER, J.. Studies on the operation of loop-seal in circulating bed boilers. **Applied Energy**, n. 86, p.1723-1731, 2009.

BASU, P.; CHENG, L.An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed.**Institution of Chemical Engineers**, vol. 78,Part A,2000.

BORO, B.**Estudo experimental da operação de um sistema de LFC com válvula loop-seal**com geometria e taxa de aeração variáveis.TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 82 p., 2015.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da Biomassa. In: (Orgs.). Biomassa para Energia. Campinas: Unicamp, p. 32-62, 2008.

CREMASCO, Marco Aurélio. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. São Paulo: Blucher, p. 423, 2012.In:

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.ME 093/94: Solos – determinação da densidade real.1994.

DIETER,H.;CHARITOS, A.; BIDWE, A. R.;WEI, A.; ZIEBA, M.Study of standpipe and loop seal behavior in acirculating fluidized bed for Geldart B particles. **In: Refereed Proceedings of the10th International Conference on CirculatingFluidized Beds and Fluidization Technology - CFB-10.Germany**,T. Knowlton, PSRI Eds, ECI Symposium Series, 2013.Disponível em <<https://dc.engconfintl.org/cfb10/75/>>Acesso em:14 mai. 2019

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 285 – 292, 1973.

HOWARD, J. **Fluidized Bed Technology**: Principles and Applications. New York: Taylor & Francis, 1989.

KIM, S. W.; KIM, S. D. Effects of particle Properties on solids recycle in loop-seal of a circulating fluidized bed. **Power Technology**, Taejon, South Korea, p.76-84, 2002.

KIM, S. W.; KIM, S. D.; LEE, D. H. Pressure balance model for circulating fluidized Beds with a Loop-seal. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v.41, p. 4949-4956, 2002.

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

LI, C.; LI, H.; ZHU, Q. A hydrodynamic model of loop-seal for a circulating fluidized bed. **Powder Technology**, China, n. 252, p.14-19, 2014.

LI, C.; ZOU, Z.; LI, H.; ZHU, Q. A hydrodynamic model of loop seal with a fluidized standpipe for acirculating fluidized bed.**Particuology**, China.p.1-9,2017.

MORITA, E. S. **Estudo Experimental das Emissões de NOx na Combustão de Carvão Mineral Brasileiro em Leito Fluidizado Rápido**. 2009. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2009.

PEÇANHA, R. P.; MASSARANI, G.. **Dimensão Característica e Forma de Partículas in XIV Encontro Sobre Escoamento Em Meios Porosos (Enemp)**, Campinas – SP, 1986. **Anais do XIV Encontro Sobre Escoamento mm Meios Porosos (Enemp)**, v. 1. pp. 302-312, 1986.

PECETE, A. S. **Estudo experimental do perfil axial de pressão a frio de um leito fluidizado circulante com distribuidor de ar.**TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 106 f., 2014.

PÉCORA, A. A. B. **Estudo da Fluidodinâmica de Leitos Fluidizados Circulantes com Injeção de Ar Secundário.** 1995. 258 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

RAMIREZ-BEHAINNE, J.J. **Estudo das Emissões de Mercúrio na Combustão de Carvão Mineral Brasileiro em Leito Fluidizado Rápido.** 2007. 234 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

RATTI, G. B. **Efeito da velocidade de fluidização e do inventário de sólidos no perfil de pressão de uma válvula *loop-seal* acoplada a um sistema de leito fluidizado circulante.**TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 74 f., 2015.

RHODES, M. J.; GELDART, D. The Hydrodynamics of Recirculating Fluidized Beds, **Circulating Fluidized Bed Technology**, Basu, P. (ed.), Pergamon Press, p. 193 – 200, 1986.

RHODES, M. J.; LAUSSMANN, P.; VILLAIN, F. and GELDART, D. Measurement of Radial and Axial Solid Flux Variations in the Riser of Circulating Fluidized Bed. **Circulating Fluidized Bed Technology II**, Pergamon Press, p. 155-164, 1988.

THOBER, C. W. DE A. **Fluidodinâmica do Leito Fluidizado Circulante para Partículas do Grupo B.** 189 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

TURINI, B. A. F. **Avaliação experimental do coeficiente de transferência de calor suspensão-parede em regime de leito fluidizado borbulhante monitorado pelo método da frequência central gaussiana.** 2017. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

VALASZEK, A.; BEHAINNE, J. J. R. **Dimensionamento de uma válvula *loop-seal* para operação em sistema de leito fluidizado circulante.** XIX Congresso Nacional de estudantes de engenharia mecânica, 2012.

WANG, P.; LU, J.; XING, W.; YANG, H.; ZHANG, M. Impact of loop seal structure on gas solid flow in a CFB system. **Powder Technology**, China, p. 177-183, 2014.

WEINSTEIN, H.; SHAO, M.; SCHNITZLEIN, M. Radial variation in solid density in high velocity fluidization. In: Basu, P. **Circulating Fluidized Bed Technology**. Pergamon Press. p. 201-206, 1983.

YANG, Wen Ching. **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems**. New York: Taylor & Francis Group, p. 861, 2003.

YAO, X.; HAIRUI, Y.; ZHANG, H.; ZHOU, C.; LIU, Q.; YUE, G. Gas-solid low behavior in the standpipe of a circulating fluidized bed with a loop seal. **Energy & fuel**. China, p. 246-250, 2010.

APÊNDICE A - ANOVA

ANOVA

Os dados da análise variância (ANOVA) do G_S podem ser observados na Tabela 2, na qual pode-se verificar a significância dos efeitos ocasionados pelos modos e pela taxa de aeração utilizados na válvula *loop-seal* nas condições experimentais testadas.

Tabela 2 - Análise de variância do G_S em função do modo de aeração

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média quadrada</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de Aeração	1839,7470	4	459,9366	69,7651	3,32E-08	3,2592
Modo de Aeração	46,0912	3	15,3637	2,3304	0,1259	3,4903
Erro	79,1118	12	6,5926			
Total	1964,95	19				

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 apresenta os dados da ANOVA para a queda de pressão no *riser* em função dos modos de aeração.

Tabela 3 - Análise de variância da queda de pressão no *riser* em função do modo de aeração

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média quadrada</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de Aeração	17182547	4	4295637	91,64363	6,9074E-09	3,2592
Modo de Aeração	532022,8	3	177340,9	3,783412	0,040349211	3,4903
Erro	562479,3	12	46873,27			
Total	18277049	19				

Fonte: Autoria própria.

A significância do efeito do modo de aeração na queda de pressão do ciclone pode ser vista na Tabela 4.

A Tabela 4 mostra a ANOVA dos modos de aeração na queda de pressão do ciclone.

Tabela 4 - Análise de variância da queda de pressão ciclone em função do modo de aeração

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média quadrada</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de Aeração	63220,2	4	15805,05	17,9787	5,25E-05	3,2592
Modo de Aeração	941,5922	3	313,8641	0,3570	0,7850	3,4903
Erro	10549,19	12	879,0995			
Total	74710,98	19				

Fonte: Autoria própria.

A significância dos efeitos ocasionados pelos modos e pela taxa de aeração na queda de pressão no *standpipe*+câmara de alimentação pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise de variância da queda de pressão *standpipe* e câmara de alimentação em função do modo de aeração

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média quadrada</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de Aeração	16427651	4	4106913	68,3805	3,72E-08	3,2592
Modo de Aeração	1973678	3	657892,7	10,9540	0,000943	3,4903
Erro	720716,2	12	60059,68			
Total	19122045	19				

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 mostra a significância dos efeitos ocasionados pelos modos de aeração e pela taxa de aeração na queda de pressão na válvula *loop-seal*.

Tabela 6 - Análise de variância da queda de pressão *loop-seal* em função do modo de aeração

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média quadrada</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de Aeração	79927,9561	4	19981,99	1,2829	0,3304	3,2592
Modo de Aeração	714028,588	3	238009,5	15,2806	0,000212	3,4903
Erro	186910,647	12	15575,89			
Total	980867,1911	19				

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar nas Tabela 7 e Tabela 8 a significância dos efeitos dos modos de aeração e da taxa de aeração no inventário de sólidos remanescente no *riser*, *standpipe* e *loop-seal*.

Tabela 7 - Análise de variância do inventário de sólidos remanescente no *riser* em função do modo de aeração

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média quadrada</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de Aeração	2547,445	4	636,8611	30,7895	3,17E-06	3,2592
Modo de Aeração	156,6595	3	52,2198	2,5246	0,1069	3,4903
Erro	248,2127	12	20,6844			
Total	2952,317	19				

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Análise de variância do inventário de sólidos remanescente no *standpipe* e *loop-seal* em função do modo de aeração

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média quadrada</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F crítico</i>
Taxa de Aeração	2547,445	4	636,8611	30,7895	3,17E-06	3,2592
Modo de Aeração	156,6595	3	52,2198	2,5246	0,1069	3,4903
Erro	248,2127	12	20,6844			
Total	2952,317	19				

Fonte: Autoria própria.