

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

PEDRO ELIAS MUNIZ PERES

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA VÁLVULA *LOOP-SEAL*
ACOPLADA A LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

PEDRO ELIAS MUNIZ PERES

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA VÁLVULA *LOOP-SEAL*
ACOPLADA A LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**

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

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA VÁLVULA LOOP-SEAL ACOPLADA A LEITO
FLUIDIZADO CIRCULANTE

por

Pedro Elias Muniz Peres

Monografia apresentada no dia 26 de junho de 2019 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados¹. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Maria Regina Parise
(UTFPR)

Prof. Dr. Everton Moraes Matos
(UTFPR)

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
(UTFPR)
Orientador

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

1- A Folha de Aprovação assinada encontra-se arquivada na Secretaria Acadêmica

Este trabalho é dedicado aos meus familiares pelo apoio e amor sem tamanho, amigos pelas ajudas e momentos de descontração e professores por fornecer todo o conhecimento adquirido.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus familiares pelo amor incondicional, pelo porto seguro que me forneceram, por todas as condições físicas e emocionais que me deram para frequentar a universidade, pelo apoio desde os momentos mais difíceis aos momentos de vitória. Com certeza todo o meu futuro poderá ser traçado de volta à alguma ação de apoio e suporte fornecido por vocês. Eu os amo.

Agradeço as amizades formadas na Universidade por todos os momentos de diversão, de tristeza, de ajuda, de risadas, por tudo que passamos juntos, que sofremos juntos e ainda iremos conquistar também juntos.

Agradeço à Hevelyne Duarte de Souza pelo apoio que supera os 1400km que separa essa amizade. Amizade que já dura seus 15 anos, e que continuará a somar por muitas décadas pela frente.

Agradeço ao Professor Jhon Jairo Ramirez Behainne pela confiança em ter me dado todos esses anos de orientação, por estar sempre aberto à discussões, por fornecer tempo, conhecimento, conselhos, ajudas e muito mais do que se espera de um orientador.

Agradeço à professora Maria Regina por ter me indicado para os primeiros trabalhos com o professor Jhon, por ter confiado em minha capacidade, por ter sido uma das primeiras e mais memoráveis professoras que tive o prazer de conhecer.

Agradeço às professoras Giane Gonçalves e Juliana Pietrobelli por terem sido duas mães incríveis para mim durante a graduação. Toda confiança, apoio, amizade que formamos será algo que eu gostarei de levar para a vida. Com certeza saber da existência de professoras como vocês é algo que me alegra e me dá muita confiança nos profissionais que estão sendo formados na UTFPR.

Agradeço também à Ana Carolina Assis pelos anos de apoio que com certeza me tornaram uma pessoa melhor.

São nossas escolhas que mostram quem
realmente somos, muito mais do que
nossas habilidades.

(ROWLING, J.K., 1998)

RESUMO

PERES, Pedro Elias Muniz. **Simulação Computacional de uma Válvula *Loop-Seal* Acoplada a Leito Fluidizado Circulante**. 2019. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

A simulação computacional da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido no interior de uma válvula *loop-seal*, acoplada a um sistema de Leito Fluidizado Circulante (LFC), foi realizada e analisada com o intuito de confrontar os resultados da aplicação da ferramenta numérica ANSYS Fluent® v.18.2 com medições experimentais do perfil de pressão estática e a taxa de recirculação de sólidos (G_s). Os resultados da fração de sólidos obtidos da simulação mostram um comportamento da interação ar-areia semelhante ao observado experimentalmente. O incremento da injeção de ar na válvula *loop-seal* confirmou a sua influência na distribuição fração gasosa no interior desse dispositivo. Os resultados das pressões obtidas na simulação seguiram também o padrão observado experimentalmente, sendo a pressão estática na câmara de alimentação *da loop-seal* sempre maior que na reciclagem. O desvio entre os valores encontrados via simulação e medições foram inferiores a 25%, sugerindo a presença de um balanço de pressão coerente. Apesar de seguir tendências semelhantes no caso da taxa de recirculação externa de partículas (G_s), os valores obtidos na simulação foram todos maiores do que dos experimentos, com desvios superiores a 100% em várias situações. Esse comportamento pôde ser atribuído às diferenças obtidas no efeito do arraste de sólidos em um leito com distribuição real de tamanho de partícula (faixa de diâmetros) em relação ao simulado considerando apenas um tamanho único de partícula de 183 μ m. Os resultados das simulações apresentados neste trabalho mostram-se promissores para seguimento de futuras pesquisas na área.

PALAVRAS-CHAVE: FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD). *LOOP-SEAL*. LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE.

ABSTRACT

PERES, Pedro Elias Muniz. **Computational Simulation of a *Loop-Seal* valve attached to a Circulating Fluidized Bed.** 2019. 78 pages. Final Paper (Bachelor Degree in Chemical Engineering) – Federal Technology University – Paraná. Ponta Grossa, 2019.

In this work, computational simulations of the gas-solid flow hydrodynamics inside a *loop-seal* valve coupled to a circulating fluidized bed system were carried out in order to compare numerical results with experimental measurements. Experimental tests and simulations were set under the same conditions to compare the static pressure profile and the solids circulation rate (G_s). Results of the solids fraction obtained from simulations showed a similar air-sand interaction behavior to those observed during tests. As expected, the increase of the aeration flow led to a more gas fraction presence in the *loop-seal* body. Moreover, the gas fraction was better distributed by simultaneously aerating the supply and recycling chambers, instead of just one of them. The static pressures obtained through simulations also were analyzed. In all cases, the static pressure in the supply chamber was always greater than in the recycling one. The deviation between the pressure values found by simulation and experiments were lower than 25%, suggesting the presence of a coherent pressure balance. Although similar trends were observed in the case of the external solids circulation rate (G_s), the values obtained through simulations were all greater than in tests, with deviations above 100% in several situations. This behavior could be explained due to the differences in the solid drag effect promoted by a real distribution of particle size (diameter range) in comparison with that of a unique particle diameter, as considered in simulations. The results of simulations presented in this work encourages new researches in this area.

KEYWORDS: *Computacional Fluid Dynamic (CFD).LOOP-SEAL. CIRCULATING FLUIDIZED BED.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Leito Fluidizado Circulante com uma <i>loop-seal</i> como sistema de recirculação de sólidos.....	6
Figura 2 - Representação esquemática do fluxo de sólidos na válvula <i>loop-seal</i>	8
Figura 3 – Efeito do modo e da taxa de aeração sobre o G_s e a fração volumétrica de sólidos (a) Injeção de ar na base da câmara de alimentação; (b) Injeção de ar horizontal adicionada na perna vertical da câmara de alimentação; (c) distribuição da fração de volume dos sólidos na câmara de alimentação obtido via CFD.....	16
Figura 4 - Comparação dos dados experimentais e previsões numéricas dos modelos EMMS e de Gidaspow em relação ao perfil de pressão pelo leito, apresentados por <i>Nikolopoulos et al. (2013)</i>	17
Figura 5- Fração volumétrica dos sólidos para (a) Ciclone, (b), <i>loop-seal</i> , (c) Fundo do riser.....	18
Figura 6 -Distribuição da pressão (a) e da fração de Volumes (b) em função da altura do sistema, apresentadas por <i>Wang et al. (2104)</i>	20
Figura 7 - Distribuição da partícula em diferentes aerações na <i>loop-seal</i>	20
Figura 8 - Distribuição da fração de volume para diferentes modelos de arraste (a) Gidaspow Laminar (b) Gidaspow Turbulento, (c) EMMS laminar, (d) EMMS Turbulento, apresentada por <i>Zhao et al. (2015)</i>	22
Figura 9 - Concentração de sólidos média em função da altura do sistema, apresentada por <i>Zhao et al. (2015)</i>	22
Figura 10 –Geometria da válvula <i>loop-seal</i> do Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Ponta Grossa.	23
Figura 11 - Leito Fluidizado Circulante do Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa.....	29
Figura 12-Detalhe da <i>loop-seal</i> do LFC	30
Figura 13 – Locais de tomada de pressão do LFC do Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa.	33
Figura 15 – Malha construída via <i>software ANSYS MESH</i> [®]	45
Figura 16 – UDF criada para garantir a preservação da massa de sólidos na <i>loop-seal</i>	47
Figura 17 – Representação das pressões consideradas para a realização da simulação.	49
Figura 18 – Planos em que foram feitos os cálculos de pressão na simulação.....	50
Figura 19 – Imagem da ocupação de areia na geometria proposta com fração de volume de 0,55.....	52
Figura 20 – Comparativo das frações de volume de areia simulado. a) Modelo Symmetric; b) Modelo Wen&yu; c) Modelo Syamlal; d) Modelo Gidaspow	56
Figura 21 – Imagem do escoamento real	57

Figura 22 – Frações volumétricas de areia para os 6 experimentos propostos.
a) 20sL/min na C.R.; b) 28sL/min na C.R.; c) 36 sL/min na C.R.; d) 16 sL/min na C.R. e 4sL/min na C.A.; e) 16 sL/min na C.R. e 12sL/min na C.A.; f) 16 sL/min na C.R. e 20 sL/min na C.A.....58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar monocâmara de 20sL/min	36
Gráfico 02 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar monocâmara de 28sL/min	38
Gráfico 03 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar monocâmara de 36sL/min	38
Gráfico 04 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 4 sL/min na CA.	41
Gráfico 05 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 12sL/min na CA.	41
Gráfico 06 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 20sL/min na CA.	42
Gráfico 07 – Comparação entre as pressões simuladas e experimental na câmara de alimentação.....	53
Gráfico 08 – Comparação entre as pressões simuladas e a experimental na Câmara de Reciclagem.....	53
Gráfico 09 – Comparação entre o G_s simulado e o experimental	54
Gráfico 10 – Comparativo entre as pressões simuladas e experimental na câmara de alimentação.....	59
Gráfico 11 – Comparativo entre as pressões simuladas e experimental na câmara de reciclagem.....	60
Gráfico 12 – Desvios entre os valores simulados e experimentais.	60
Gráfico 13 – Comparativo entre o G_s Simulado e o G_s Experimental.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades físicas e fluidodinâmicas das partículas de areia usadas por SEO et al. (2011).....	15
Tabela 2- Variáveis experimentais e suas variações usadas por SEO et al. (2011).....	15
Tabela 3- Variáveis utilizadas na simulação de Nikolopoulos et al. (2013)	17
Tabela 4- Parâmetros experimentais utilizados no trabalho de Wang et al. (2104).	19
Tabela 5 - Propriedades físicas da partícula utilizadas no trabalho de Wang et al. (2104).....	19
Tabela 6 - Condições de operação e propriedades das fases, apresentadas por Zhao et al. (2015).....	21
Tabela 07 – Propriedades da partícula	27
Tabela 08 – Propriedades para a fase secundária.....	28
Tabela 09 – Condições de contorno para as zonas da malha simulada	29
Tabela 10 - Vazão volumétrica nas câmaras de reciclagem e alimentação para cada ensaio proposto	32
Tabela 11 – Resultados das pressões para alimentação monocâmara de 20sL/min	35
Tabela 12 –Pressões para injeção de ar monocâmara de 28sL/min.	37
Tabela 13 - Pressões para injeção de ar monocâmara de 36sL/min.....	37
Tabela 14 - Pressões para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 4sL/min na CA.	39
Tabela 15 - Pressões para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 12sL/min na CA.	40
Tabela 16 - Pressões para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 20sL/min na CA.	40
Tabela 17 – Valores de G_s obtidos dos experimentos	43
Tabela 18 – Valores convertidos das vazões de alimentação de ar na loop-seal.	51
Tabela 19 – Resumo dos resultados simulados e experimentais.	59

Lista de Símbolos

A – Área (m²).

C – Parâmetro relativo à geometria de *loop-seal*.

d – Diâmetro (m).

\vec{F} – Força (N).

f – Fator de atrito.

g - Fator de conversão de unidades.

G – Taxa de recirculação de partículas (kg.s/m²).

H – Altura da barreira (m).

h – Entalpia (kJ/kg).

L – Altura (m).

\dot{m} – Transferência de fase (kg/m². s).

m – Massa (kg).

P – Pressão nas condições de operação (Pa).

\vec{q} – Fluxo Térmico da fase q (W.m⁻²).

Q – Intensidade de calor trocado entre as fases p e q (J/s).

R – Taxa de expansão semi-empírica.

\vec{R} – Força de interação entre as fases (N).

S – Recurso do ANSYS FLUENT® que inclui fontes de entalpia.

SG – Gravidade específica do ar.

T – Temperatura nas condições de operação (°C).

t – Tempo (s).

u – Velocidade da fase sólida e/ou gasosa na *loop-seal* (m/s).

V – Volume ocupado (m³).

\vec{v} – Vetor velocidade utilizado pelo software ANSYS FLUENT® (m/s).

Letras Gregas

α – Fração volumétrica.

β – Coeficiente de transferência de momento.

ΔP - Queda de pressão (Pa).

Δu – Velocidade relativa do gás (m/s).

∇p – Gradiente de pressão compartilhada (Pa).

ε - Fração de vazios.

λ – Viscosidade de cisalhamento (m²/s).

μ - Viscosidade dinâmica [kg/(m.s)].

ρ – Densidade (kg/m³).

$\bar{\tau}$ – Tensor de Tensão.

ϕ – Esfericidade.

Subscrito

0 – Condições de operação

c – Ciclone

f – *riser*

g – Abertura entre a câmara de alimentação e Reciclagem

lift – Sustentação

m – Total

n – n-ésima fase

o – Em leito fixo

p – partículas

q – q-ésima fase

rp – Tubo de reciclagem

r – Câmara de reciclagem

rg – do gás pelo tubo de reciclagem

rq – Volumétrica média da fase q no domínio da solução

s – *standpipe*

ss – descendente do ar no *standpipe*

sg – ascendente do ar no *standpipe*

S – Sólidos

vm – Massa virtual

v – Volumétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
1.1 OBJETIVO GERAL	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE.....	6
2.2. VÁLVULA LOOP-SEAL.....	8
2.2.1. Queda de pressão no <i>standpipe</i> (ΔP_s)	9
2.2.2. Queda de pressão na abertura de passagem entre câmaras (ΔP_g)	10
2.2.3. Queda de pressão na câmara de reciclagem (ΔP_r).....	11
2.2.4. Queda de pressão no tubo de reciclagem (ΔP_{rp}).....	11
2.3. MODELOS MULTIFÁSICOS E FUNÇÕES DE ARRASTE FLUIDO-PARTÍCULA.....	12
2.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM VÁLVULA LOOP-SEAL.....	14
3. METODOLOGIA	23
3.1. SIMULAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)	23
3.1.1. Desenho da geometria e da malha	23
3.1.2. Modelos e Equações do <i>Software</i>	24
3.1.3. Especificações da Simulação	27
3.2. EXPERIMENTOS NO SISTEMA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE	29
3.2.1 Materiais e equipamentos utilizados	30
3.2.2. Operação e Coleta de Dados	31
3.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E TRATAMENTO DOS DADOS	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	34
4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	44
5. CONCLUSÃO	62
6. REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

A operação conhecida por fluidização foi introduzida há quase um século pelo Alemão Fritz Winkler, que percebeu, em 1921, o curioso comportamento de partículas de coque efervescendo como um líquido após ter uma corrente de gases injetada na base de um recipiente (BASU, 2015, p.1). Alguns anos depois do experimento de Winkler, uma vertente dessa operação gás-sólido que utilizava correntes de fluido a altas velocidades, conhecida como fluidização rápida, teve começo na área de beneficiamento do petróleo nas unidades de craqueamento catalítico. Hoje, a fluidização rápida é utilizada com sucesso também em sistemas de leito fluidizado circulante (LFC) nas áreas de conversão energética de combustíveis para produção de calor e eletricidade, em operações de secagem e separação, e na transformação de minérios da indústria metalúrgica, entre outras aplicações (BASU, 2015, p.1). Detalhes das aplicações industriais, operação e conceitos envolvendo o leito fluidizado circulante são discutidos na seção 2.1.

Os estudos sobre leitos fluidizados circulantes foram intensificados nos países desenvolvidos na década de oitenta, contribuindo de maneira importante na descrição operacional de unidades e sistemas em escala de laboratório ou industrial. No entanto, a revisão da literatura mostra que ainda continuam sendo realizadas muitas pesquisas na área, as quais procuram desenvolver novas aplicações ou melhorias na eficiência de processos já existentes, como por exemplo os trabalhos de TU & WANG(2018) e XU *et al*(2018). No caso específico do Brasil, o uso da tecnologia da fluidização rápida ainda é incipiente, tendo-se a necessidade de desenvolver estudos para o ajuste desses sistemas à realidade dos combustíveis nacionais e/ou processos industriais com potencial de aumento no rendimento.

Atualmente, o Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa dispõe de uma unidade de fluidização rápida a frio (UFRAF) em escala de laboratório. Com essa unidade, ilustrada na Figura 11 do capítulo 4, trabalhos têm sido realizados na busca pela melhor compreensão de fenômenos fluidodinâmicos acontecidos no interior de vários dos seus componentes em função de diversas

variáveis operacionais, como demonstrado pelos trabalhos apresentados por PECETE (2014) e RATTI (2015).

No entanto, a prática constante na alteração das variáveis de funcionamento ou das características dos componentes da unidade, afim de se encontrar uma situação ótima de operação em aplicações específicas, torna o procedimento experimental custoso, demorado e/ou impraticável em algumas situações delimitadas pela geometria do sistema. Assim, surge a necessidade do desenvolvimento desta unidade de uma maneira mais ágil, com o qual consiga-se prever alguns comportamentos do escoamento gás-sólido. Uma alternativa encontrada nesse sentido é o uso da ferramenta da fluidodinâmica computacional (CFD), utilizada a partir de meados dos anos cinquenta com o desenvolvimento dos modelos de simulação numérica e dos computadores (ENGLISH, 2017).

As principais equações utilizadas atualmente nos modelos CFD foram incorporadas a partir do momento em que grandes empresas tecnológicas como a Boeing e a NASA passaram a colaborar com o seu desenvolvimento. A introdução das equações de Euler, permitiram um grande passo para a simulação computacional, e por volta de 1995, empresas automotivas como a General Motors e a Ford reconheceram as utilidades dos modelos e adotaram a tecnologia. (ENGLISH, 2017).

Desse modo, o trabalho em questão propõe a simulação computacional CFD via ANSYS FLUENT® v18.2, da região de recirculação de sólidos do leito fluidizado circulante, conhecida como válvula *loop-seal*, em conjunto com alguns procedimentos experimentais, afim de se determinar a validade das simulações para que as mesmas possam ser usadas no futuro, economizando tempo e recursos na busca por condições ótimas de operação.

A justificativa desse trabalho dá-se por diversos fatores, dentre os quais destacam-se: a necessidade do conhecimento das características fluidodinâmicas para o futuro desenvolvimento de uma válvula *loop-seal* acoplada a um leito fluidizado circulante à quente, e o conhecimento da influência das funções de arraste gás-sólido (discutido na seção 2.3) para o componente em questão, uma vez que diversos autores divergem sobre a melhor solução.

Destaca-se também a relevância deste estudo para o avanço de sistemas de leito fluidizado circulante em aplicações industriais, e o aprendizado sobre *softwares* de simulação aplicados a operações com escoamento multifásico.

Dessa maneira, descrevem-se a seguir os objetivos geral e específicos do presente trabalho de conclusão de curso.

1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a simulação computacional da fluidodinâmica gás-sólido no interior de uma válvula *loop-seal* acoplada a um sistema de Leito Fluidizado Circulante.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os modelos computacionais gás-sólido disponíveis na literatura para sua aplicação apropriada ao caso em estudo;
- Simular a operação da válvula *loop-seal* de acordo com condições iniciais e de contorno pré-estabelecidas;
- Realizar testes experimentais nas mesmas condições operacionais simuladas;
- Comparar os resultados computacionais com os experimentais, afim de realizar a validação dos modelos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

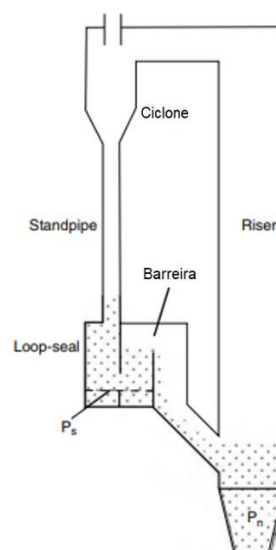
Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os principais temas relacionados ao assunto deste trabalho.

2.1. LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Segundo BASU (2015, p.4), Leitos Fluidizados Circulantes (LFC) são dispositivos amplamente utilizados em caldeiras aquotubulares, nas quais partículas de combustível entram em combustão em quanto são transportadas a altas velocidades de fluidização, em ambiente isotérmico cíclico e com intensidade de recirculação de sólidos adequada para a geração de vapor de processo com elevada eficiência térmica.

A Figura 1 mostra o esquema de uma fornalha de Leito Fluidizado Circulante. O LFC é dividido em 4 componentes principais: uma coluna por onde as partículas sólidas e o gás ascendem (*riser*) e ocorre a combustão em regime de fluidização rápida; um ciclone, que realiza a separação gás-partícula; uma coluna por onde os sólidos descendem (*standpipe*), após serem descarregados pelo ciclone; e uma válvula não-mecânica de recirculação de sólidos (*loop-seal*), discutida na seção 2.2.

Figura 1 - Leito Fluidizado Circulante com uma válvula *loop-seal* como sistema de recirculação de sólidos.



A câmara de combustão do LFC (*riser*) possui sempre em seu interior uma massa de sólidos (inventário) que é carregada pela alta velocidade do gás de fluidização (ar). O sólido é posteriormente recuperado pelo separador gás-sólido (ciclone) e direcionado ao *standpipe*, que por sua vez encaminha essas partículas para o dispositivo de reciclagem dos sólidos (BASU & BUTLER, 2009 p.1723). Este dispositivo tem a função ativar o transporte das partículas desde uma região de baixa pressão (parte superior do *standpipe*) para outra de alta pressão (câmara de combustão ou *riser*) sem o auxílio de partes móveis, apenas por meio de injeção de ar (BASU, 2015, p. 230).

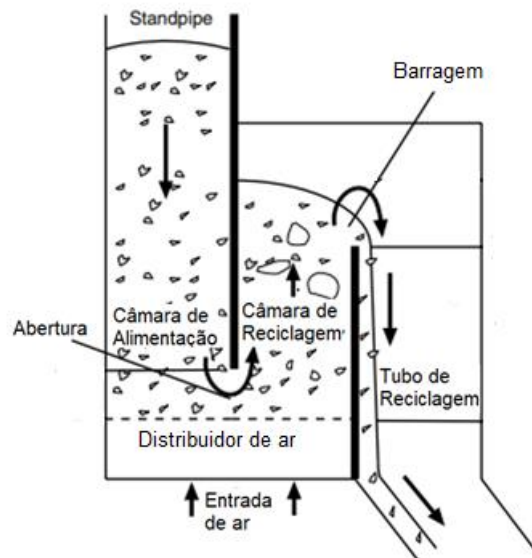
A principal característica operacional de um leito fluidizado circulante radica nas condições fluidodinâmicas atingidas no interior do *riser* e no dispositivo de reciclagem dos sólidos. No *riser*, essa condição fluidodinâmica é conhecida como fluidização rápida, na qual existe dependência entre a velocidade do gás, a taxa de recirculação de sólidos, as propriedades das partículas, o inventário ou massa total de leito e a geometria do sistema (BASU, 2006 p.7). Já, no dispositivo de reciclagem dos sólidos, é possível identificar os regimes de leito móvel e de fluidização borbulhante, dependendo da geometria e do modo como acontece a aeração.

O uso de um LFC para a queima de combustíveis traz algumas vantagens. O combustível constitui, no máximo, apenas cerca de 3% em massa da composição do inventário do leito, sendo o restante composto de sólidos inertes como cinzas e areia. A condição de fluidização rápida garante uma excelente mistura gás-sólido e sólido-sólido (BASU, 2015, p. 8). Dessa forma, os combustíveis se espalham com rapidez pela massa de sólidos do leito, que "aquecem essas partículas acima da temperatura de ignição sem redução significativa na temperatura do leito." (BASU, 2015, p.8). A eficiência de combustão das partículas pode alcançar 98%, principalmente devido à intensidade promovida na recirculação das partículas não queimadas. Além disso, o LFC traz a vantagem do elevado potencial na captura de poluentes atmosféricos, como os óxidos de enxofre, e a baixa emissão de óxidos de nitrogênio (BASU, 2015, p.9-10).

2.2. VÁLVULA LOOP-SEAL

A válvula *loop-seal* é o tipo de dispositivo de recirculação de sólidos mais usado em sistemas de LFC comerciais. A sua geometria é composta por uma câmara de alimentação de partículas localizada imediatamente na base do *standpipe*, bem como por uma câmara de reciclagem de sólidos, que conecta ao tubo de descarga interligando a *loop-seal* ao *riser* (PEINING *et al.* 2014 p.177). A Figura 2 mostra a representação esquemática do fluxo de sólidos escoando através de uma válvula *loop-seal*.

Figura 2 - Representação esquemática do fluxo de sólidos na válvula *loop-seal*.



Fonte: Adaptado de BASU, 2006 p.419

O projeto da *loop-seal* é realizado de forma a garantir que a pressão na superfície dos sólidos confinados na câmara de reciclagem seja maior ou igual à pressão no ponto de reentrada de sólidos do *riser*. Isso se logra mediante a injeção de ar ou de outro gás na base da válvula, como representado na Figura 2. O gás pode ser injetado em ambas as câmaras simultaneamente, no entanto, na maioria das operações, a aeração em apenas uma das câmaras é suficiente (BASU & CHENG, 1999 p.203).

O ar injetado na câmara de reciclagem atravessa os sólidos, fluidizando-os parcial ou totalmente, promovendo a expansão do leito. Dessa forma, os sólidos fluidizados conseguem superar a altura da barragem, que posteriormente descendem

pela ação da gravidade pelo tubo de reciclagem em direção ao *riser* (BASU, 2006, p.418-420).

Do ar injetado, espera-se que apenas uma parcela siga em direção ao *standpipe* via câmara de alimentação, onde é formado um leito móvel. Pela ação conjunta da gravidade e do aumento da porosidade na câmara de reciclagem da *loop-seal*, esses sólidos passam da câmara de alimentação para a de reciclagem, onde são posteriormente transferidos ao *riser*. É importante que as partículas no *standpipe* não sejam totalmente fluidizadas, a fim de evitar a formação do regime pistonado (*slugging*) na região e assim manter o controle da taxa de recirculação de sólidos e a estabilidade operacional do sistema (BASU & CHENG, 1999 p.204)

A taxa de reciclagem de sólidos que a *loop-seal* irá fornecer é resultado da interação de quatro resistências mecânicas, determinadas por quedas de pressão medidas no sistema de LFC, em relação à queda de pressão no *riser* (ΔP_f). (BASU & CHENG, 1999 p.208). Essas resistências são: a queda de pressão do *standpipe* até a base da câmara de reciclagem ΔP_s , a queda de pressão ocasionada pela passagem de sólidos através da abertura horizontal ΔP_g , a queda de pressão na câmara de reciclagem ΔP_r e a queda de pressão no tubo de reciclagem ΔP_{rp} . Assim, o balanço de pressão no circuito pode ser apresentado pela expressão:

$$\Delta P_s + \Delta P_g + \Delta P_r + \Delta P_{rp} + \Delta P_f + \Delta P_c = 0 \quad (1)$$

sendo ΔP_f e ΔP_c as respectivas quedas de pressão no *riser* e no ciclone.

Dessa maneira, pode-se remanejar a equação 1 de forma a deixar evidenciadas as 4 resistências principais para a região do dispositivo de recirculação de sólidos, na qual a *loop-seal* faz parte:

$$\Delta P_s + \Delta P_g + \Delta P_r + \Delta P_{rp} = -\Delta P_f - \Delta P_c \quad (2)$$

2.2.1. Queda de pressão no *standpipe* (ΔP_s)

A queda de pressão observada no *standpipe* pode ser considerada o resultado da soma de dois efeitos: o necessário para vencer a tensão de cisalhamento viscosa,

e o requerido para vencer a perda de energia cinética (HOWARD, 1989, p.27). Kunii e Levenspiel (1991) definem a queda de pressão devido à passagem do gás percolando o leito de partículas no *standpipe* como:

$$\frac{\Delta P_s}{L_s} g_c = 150 \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu \Delta u}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_m) \rho_g (\Delta u)^2}{\varepsilon_m^3 \phi_s d_p} \quad (3)$$

onde, L_s é a altura dos sólidos na coluna do *standpipe*, g_c é um fator de conversão de unidades, ε_m representa a fração de porosidade, ϕ_s , a esfericidade das partículas, d_p , o diâmetro médio das partículas, μ , a viscosidade dinâmica do gás, ρ_s , a densidade dos sólidos e Δu , a velocidade relativa do gás em relação à do sólido.

A velocidade relativa do gás (Δu) é dada pela soma da velocidade ascendente do ar no *standpipe*, u_{sg} , e a velocidade descendente dos sólidos u_{ss} . (BASU & CHENG, 1999 p.208):

$$\Delta u = u_{sg} + u_{ss} \quad (4)$$

A fração de porosidade no *standpipe* (ε_m) é dada pela equação 5:

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{1 - \varepsilon_o}{R} \quad (5)$$

onde, ε_o representa a fração de porosidade no leito fixo e, R , a taxa de expansão, calculada de forma semi-empírica.

A taxa de circulação de sólidos pelo *standpipe* (G_s) é dada por:

$$G_s = \rho_s (1 - \varepsilon_m) u_{ss} \quad (6)$$

sendo, ρ_s , a densidade dos sólidos.

2.2.2. Queda de pressão na abertura de passagem entre câmaras (ΔP_g)

Os sólidos migram da câmara de alimentação para a câmara de reciclagem por meio de uma abertura que conecta as duas câmaras. A queda de pressão é dada pela

soma das quedas de pressão resultantes do escoamento do gás e também das partículas sólidas pela região (BASU & CHENG 1999, p.209).

A equação 7 mostra a relação para o cálculo de ΔP_g , onde f_g é o fator de atrito do gás, u_g é a velocidade do gás pela abertura e C é um parâmetro relativo à geometria da *loop-seal*:

$$\Delta P_g = CG_s + \frac{1}{2} f_g \rho_g u_g^2 \quad (7)$$

No entanto, Basu e Cheng (1999) afirmam que a perda de atrito do gás pela abertura é muito menor que o primeiro termo da equação e pode ser desprezado. Assim, a equação 8 traz sua forma simplificada, com o cálculo do parâmetro C para a geometria da *loop-seal*:

$$\Delta P_g = 0.66 \left(\frac{A_g}{A_{sp}} \right)^{-1.2} G_s \quad (8)$$

Sendo A_g a área da abertura da passagem entre a câmara de alimentação e a câmara de reciclagem e A_{sp} a área transversal do *standpipe*.

2.2.3. Queda de pressão na câmara de reciclagem (ΔP_r)

Quando a *loop-seal* opera acima da velocidade mínima de fluidização das partículas, a queda de pressão na câmara de reciclagem é estimada pela equação 9 (Basu & Cheng, 1999 p. 209):

$$\Delta P_r = (1 - \varepsilon_r) \rho_s H_r g_c \quad (9)$$

sendo a fração de porosidade na câmara de reciclagem (ε_r) em torno de 0,5, com H_r representando a altura da barragem (*weir*) em relação à base da placa distribuidora de ar da *loop-seal*.

2.2.4. Queda de pressão no tubo de reciclagem (ΔP_{rt})

A diferença de pressão entre dois pontos no tubo de reciclagem é dada por três fatores: carga estática, energia cinética dos sólidos e a resistência por atrito (ΔP_{rt}).

Dessa maneira, Basu & Cheng (1999) definem a queda de pressão no tubo de reciclagem como:

$$\Delta P_{rp} = \frac{[(1 - \varepsilon_{rp})\rho_s - \varepsilon_{rp}\rho_s]gL_{rp}\sin\theta}{g_c} + \Delta P_{rf} \quad (10)$$

sendo ε_{rp} a fração de vazio no tubo de reciclagem e, L_{rp} o comprimento do tubo. Considera-se desprezível a energia cinética das partículas.

Para sólidos bem distribuídos, a fração de porosidade pode ser calculada por:

$$\varepsilon_{rp} = 1 - \frac{G_s}{u_{rs}\rho_s} \frac{A_s}{A_{rp}} \quad (11)$$

sendo u_s a velocidade da partícula no tubo de reciclagem, A_s a área transversal do tubo de reciclagem.

Já, a perda de carga devido ao atrito das partículas no tubo é determinada por:

$$\Delta P_{rf} = \Delta P_{rfg} + \Delta P_{rfs} = \frac{2f_{rg}\rho_g u_{rg}^2 L_{rp}}{g_c d_{rp}} + \frac{2f_{rs}G_s u_{rs} L_{rp}}{g_c d_{rp}} \quad (12)$$

sendo que f_{rg} é o fator de atrito do gás (uma função do número de Reynolds), d_{rp} , o diâmetro do tubo de reciclagem, e u_{rg} , a velocidade do gás no tubo de reciclagem.

2.3. MODELOS MULTIFÁSICOS E FUNÇÕES DE ARRASTE FLUIDO-PARTÍCULA

A simulação computacional de problemas envolvendo sistemas de leito fluidizado circulante requer aproximações na modelagem do escoamento multifásico. O *software* ANSYS FLUENT® v.18.2, utilizado para as simulações neste trabalho, apresenta duas aproximações para os cálculos numéricos multifásicos: a aproximação Euleriana-Euleriana (Euleriana) e a aproximação Euleriana-Lagrangiana (Lagrangiana). Ambas as aproximações possuem dois tipos de tratamento. Para a aproximação Euleriana existem os tratamentos ponto-força e fluido-misto, e para a lagrangiana, os tratamentos ponto-força e superfícies resolvidas (CROWE *et al.*

2016, cap.13, p.11). As definições de cada aproximação serão focadas no tratamento ponto-força, que representa o fluxo sobre uma partícula a partir de tratamentos empíricos e teóricos para se obter a força sobre a partícula (CROWE *et al.* 2016, cap.13, p.12).

Na aproximação Lagrangiana, as trajetórias são computadas de forma diferente para as partículas e para a fase-contínua, o gás. Enquanto as partículas são computadas por equações diferenciais ordinárias, baseadas na localização da partícula em movimento (Forma lagrangiana), a fase contínua é calculada por meio de equações diferenciais parciais, baseadas em um *grid* computacional fixo. (CROWE *et al.* 2016, cap.13. p.13)

Quanto à aproximação Euleriana, Crowe *et al.* (2016, cap.13 p.17) afirmam que a mesma pode ser descrita como um continuum, ou seja, uma sequência contínua onde elementos adjacentes não são perceptivelmente diferentes um do outro, mesmo que seus extremos sejam distintos.

ANSYS FLUENT® (2019) complementa a informação trazida por Crowe *et al.* (2016) com a seguinte colocação: “Uma vez que o volume de uma fase não pode ser ocupado por outras fases, é introduzido o conceito de fração volumétrica da fase.” A fração volumétrica é considerada uma função do espaço e do tempo, com soma total igual a 1.

Dessa forma, é possível realizar uma comparação de ambas as aproximações sobre o ponto de vista do tratamento ponto-força. Crowe *et al.* (2016, cap.13, p.19) apontam que as aproximações Lagrangianas são fisicamente mais robustas para reflexões das partículas em superfícies, separação de partículas, interações entre partículas (como a coalisão e a coalescência), partículas em contra-fluxo e difusões turbulentas.

Dentre as vantagens da aproximação Euleriana de se descrever as partículas como parte de um *continuum*, podem mencionar-se a necessidade de menos graus de liberdade e a permissão que ambas as fases tem para serem lidadas com esquemas e *grids* numéricos consistentes. A discretização no tratamento das partículas são também vantagens para quando se deseja computar os efeitos das

partículas em fluidos contínuos para o pareamento bidirecional, economizando tempo e memória computacional (CROWE, 2016, cap.13, p.19).

Por outro lado, a definição de força de arraste é oriunda da Teoria Cinética de Escoamento Granular (KTGF), onde a transferência de momento entre duas fases apresenta um papel importante (BENZARTI *et al.* 2012, p.111). Para a KTGF, a equação de momento é resolvida em conjunto com o coeficiente de transferência de momento β , estudado por diversos autores e comparados por Benzarti *et al.* (2012). Dentre os diversos modelos de resolução do coeficiente de transferência de momento, destacam-se Wen-Yu, Gidaspow, Syamlal e O'Brian e o modelo de Minimização Energética Multi-Escalar (EMMS).

ANSYS FLUENT® (2019) traz informações simplificadas de cada modelo, relatando que o modelo de Wen Yu é direcionado para escoamentos onde a fase secundária é diluída e significativamente menor que a primária. Também, são apresentados o modelo de Gidaspow, sendo este o mais relacionado em leitos fluidizados densos, os modelos de Syamlal e O'Brian utilizando viscosidade granular, e o EMMS, sendo este, uma função definida pelo usuário e integrada por meio de linguagem computacional.

Comparações entre esses modelos foram realizados por diversos autores, como Wang *et al.* (2014) e Zhao *et al.* (2015), apresentados na seção 2.4 deste trabalho. Luna (2013) relata em sua tese que os resultados quantitativos das simulações podem ser diferentes quando são aplicados diferentes modelos de arraste.

2.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM VÁLVULA LOOP-SEAL

Seo *et al.* (2011) conduziram um estudo de simulação computacional da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido em um gaseificador de leito fluidizado duplo com processo de combustão cíclica. No projeto e construção do equipamento, foi empregada uma válvula não-mecânica para viabilizar a operação em alta temperatura, sendo essa válvula uma *loop-seal*. Nesse estudo, as taxas de circulação de sólidos (G_s) e as características do escoamento das partículas sólidas medidas

experimentalmente foram validadas por meio de uma simulação bidimensional via ANSYS FLUENT®. (SEO *et al.* 2011, p.804-805). Para tal, foram utilizadas as propriedades físicas e fluidodinâmicas das partículas descritas na Tabela 1 e as variáveis especificadas na Tabela 2.

Tabela 1- Propriedades físicas e fluidodinâmicas das partículas de areia usadas por SEO *et al.* (2011).

Propriedades	Valores
Diâmetro médio ($d_p, \mu\text{m}$)	250
Densidade da partícula ($\rho_p, \text{kg/m}^3$)	2466
Densidade volumétrica ($\rho_v, \text{kg/m}^3$)	1281
Velocidade mínima de fluidização ($U_{mf}, \text{m/s}$)	0,0603
Velocidade Terminal ($U_t, \text{m/s}$)	1,403

Fonte: SEO *et al.*, 2011, p. 805

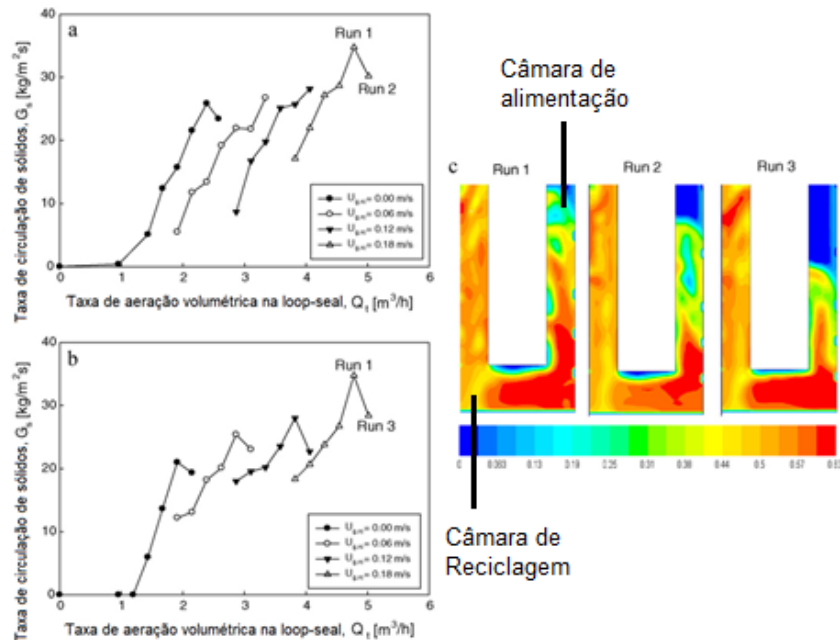
Tabela 2- Variáveis experimentais e suas variações usadas por SEO *et al.* (2011).

Variáveis	Intervalo
Velocidade do gás no riser ($U_{gr}, \text{m/s}$)	3,50-4,25
Velocidade do gás no leito fluidizado borbulhante ($U_{g,b}, \text{m/s}$)	0-0,27
Velocidade da aeração vertical ($U_{g,vertical}, \text{m/s}$)	0-0,075
Velocidade de aeração da câmara de alimentação ($U_{g,sc}, \text{m/s}$)	0-0,075
Velocidade de aeração da câmara de reciclagem ($U_{g,rc}, \text{m/s}$)	0-0,36
h/l (altura/linha da base)	1,25-8,0

Fonte: SEO *et al.*, 2011, p. 805

As partículas sólidas foram inseridas diretamente na válvula *loop-seal*, com as condições de contorno informadas ao programa em termos da velocidade do gás no *riser* e na *loop-seal*, conforme resultados experimentais. O modelo de arraste utilizado foi o de Gidaspow. Para todas as superfícies de saída, foi especificada a pressão de 1 atm; para a fase gasosa foi determinada a condição de não-deslizamento nas paredes. Adicionalmente, foi utilizado um coeficiente de restituição de 0,9 (SEO *et al.* 2011, p.806). A imagem da Figura 3 mostra alguns resultados desse estudo.

Figura 3 – Efeito do modo e da taxa de aeração sobre o G_s e a fração volumétrica de sólidos (a) Injeção de ar na base da câmara de alimentação; (b) Injeção de ar horizontal adicionada na perna vertical da câmara de alimentação; (c) distribuição da fração de volume dos sólidos na câmara de alimentação obtido via CFD.



Fonte: SEO *et al.* 2011, p. 806.

A Figura 3 indica um comportamento quase linear entre a taxa de aeração na *loop-seal* e a taxa de recirculação de sólidos (G_s). No entanto a formação de bolhas grandes na câmara de reciclagem leva ao escoamento pistonado intermitente (*slugging*), ocasionando na formação dos picos seguidos da queda do valor do G_s em função da aeração. (SEO *et al.* 2011, p.807).

Um outro objetivo desse trabalho era avaliar a influência da aeração na câmara de reciclagem e na câmara de alimentação para o controle da taxa de recirculação de sólidos. Seo *et al.* (2011) concluíram que, apesar dos resultados com a aeração na câmara de alimentação apresentarem altos valores de G_s , não foi possível ultrapassar o valor desejado de $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, sugerindo que o controle do G_s pela câmara de alimentação não foi satisfatório para as condições operacionais em questão (SEO *et al.*, 2011, p.808).

Anos mais tarde, Nikolopoulos *et al.* (2013) propuseram uma nova abordagem para o modelo de arraste utilizado nas simulações. O trabalho buscava a realização de uma simulação tridimensional de um queimador de leito fluidizado circulante, com

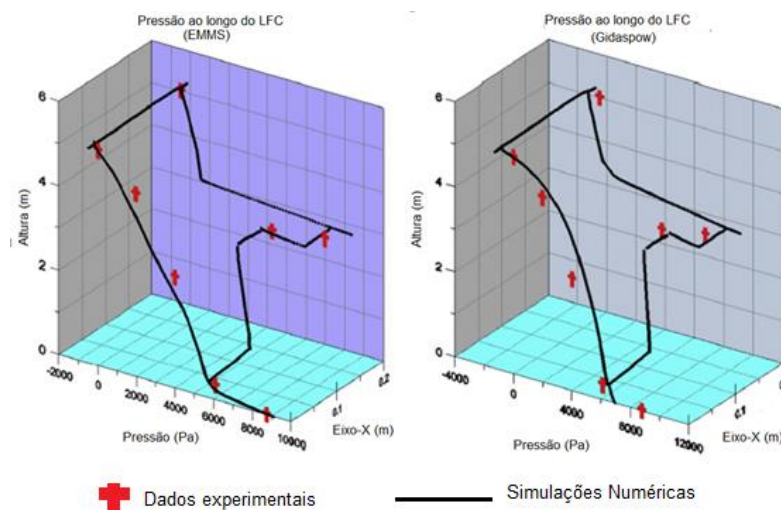
uma válvula *loop-seal* acoplada, partindo da ideia de que o modelo de Gidaspow superestima as forças de arraste e que a aplicação de um modelo de minimização energética multi-escalar (EMMS) poderia ser utilizado. Dentre os objetivos principais desse trabalho, estava a avaliação dos esquemas de arraste, tanto para Gidaspow quanto para o modelo EMMS, comparados com os dados experimentais de pressão. Também foi analisado o perfil da fração de volumes para o leito fluidizado circulante, a taxa de recirculação de sólidos e as características do escoamento (NIKOLOPOULOS *et al.*, 2013, p.138). Os autores utilizaram o *software* FLUENT® 2010, sendo as condições de contorno para o gás na parede especificadas para não-deslizamento e coeficiente de restituição 0,9, sob as condições operacionais apresentadas na Tabela 3. Alguns dos resultados obtidos na pesquisa são apresentados na Figura 4.

Tabela 3- Variáveis utilizadas na simulação de Nikolopoulos *et al.* (2013)

Variáveis	Valores
d_s (diâmetro da partícula)	142 μm
ρ_s (densidade da partícula)	5700 kg/m^3
ρ_g (densidade do gás)	1,225 kg/m^3
μ_g (viscosidade dinâmica do gás)	1,7894 $\times 10^{-5}$ kg/m.s
e_{ss} (coeficiente de restituição)	0,9
ε_s máx (fração volumétrica máxima de sólidos)	0,65
ε_s fr (fração volumétrica do sólido friccional)	0,5

Fonte: NIKOLOPOULOS *et al.* 2013, p.141

Figura 4 - Comparação dos dados experimentais e previsões numéricas dos modelos EMMS e de Gidaspow em relação ao perfil de pressão pelo leito, apresentados por Nikolopoulos *et al.* (2013).

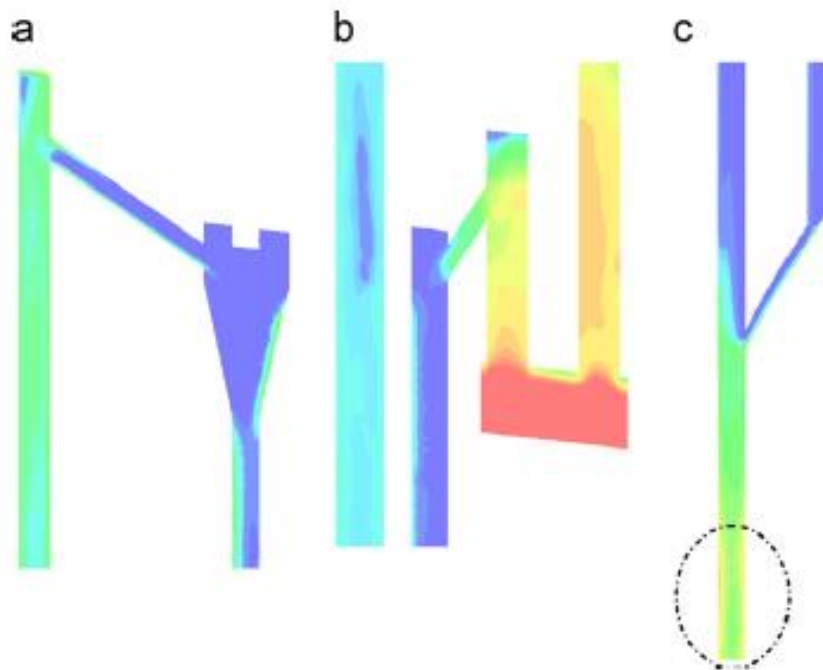


Fonte: NIKOLOPOULOS *et al.* 2013, p.143

A Figura 4 mostra uma comparação entre os dois modelos de arraste considerados. Nikolopoulos *et al.* (2013, pag.143) concluíram em seu trabalho que o modelo de EMMS reflete uma maior aproximação aos resultados obtidos experimentalmente do que o modelo de Gidaspow.

Na Figura 5 podem-se observar os contornos de fração de volumes para a fase sólida, obtida pela simulação via FLUENT® na região do ciclone, *loop-seal* e fundo do *riser*.

Figura 5- Fração volumétrica dos sólidos para (a) Ciclone, (b), *loop-seal*, (c) Fundo do *riser*.



Fonte: NIKOLOPOULOS *et al.* 2013, p.146

No ano seguinte, Wang *et al.* (2014) utilizaram a fluidodinâmica computacional para realizar um estudo das características de escoamento gás-sólido de um leito fluidizado circulante com *loop-seal*, semelhante ao trabalho apresentado por Seo *et al.* (2011). No entanto, a geometria simulada de Wang *et al.* (2014) era tridimensional e suas condições de contorno assumiam valores distintos dos utilizados por Seo *et al.* (2011). De forma análoga, experimentos foram realizados em leito fluidizado circulante a frio e os resultados comparados com a simulação realizada. No entanto, destaca-se a afirmação feita por Wang *et al.* (2014), que contradiz as conclusões do trabalho de

Seo *et al.* (2011). Wang *et al.* (2014 p. 823) afirma que “A aeração para a *loop-seal* foi feita apenas na câmara de alimentação, que como provado por outros estudos anteriores, é o modo mais efetivo de circulação de partículas.” Contradição evidenciada pelo fato de Seo *et al.* (2011) ter concluído que a taxa de circulação de partículas ser menos eficiente quando a alimentação ocorrera apenas na câmara de alimentação.

Diferentemente das simulações anteriores, Wang *et al.* (2104) optaram pelo uso do modelo de arraste Wen e Yu, com base em experimentos anteriores realizados pelo autores, concluindo que esse era o modelo mais apropriado para suas condições de contorno (WANG *et al.*, 2014, p. 820).

As propriedades físicas das partículas sólidas usadas do experimento e as variáveis utilizadas nesse estudo são mostradas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4- Parâmetros experimentais utilizados no trabalho de Wang *et al.* (2104).

Variáveis	Valores usados no experimento
Taxa de aeração na <i>loop-seal</i> , Q_i , (m ³ /h)	1,5; 2,0; 2,5
Velocidade de fluidização no <i>riser</i> , U_r , (m/s)	3,75; 4,72; 15,4
Inventário total no leito, M_p , (kg)	9,8; 11,8; 15,4

Fonte: WANG *et al.*, 2014, p. 823

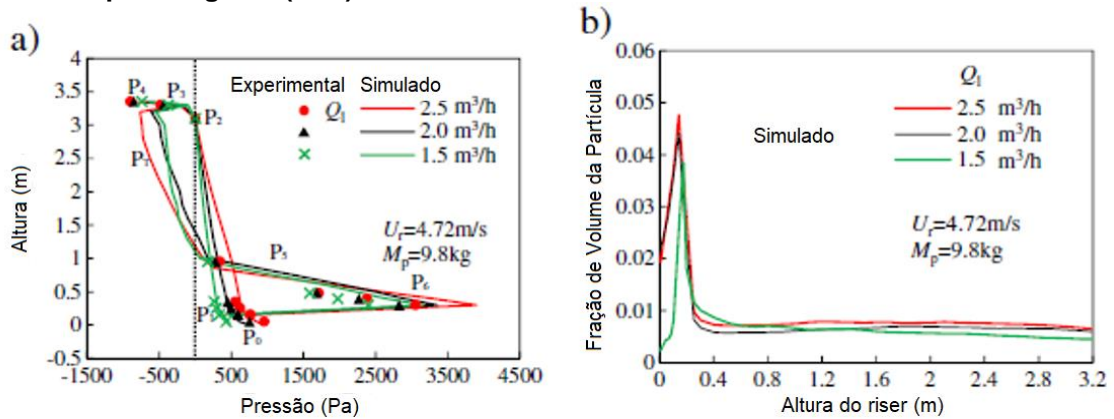
Tabela 5 - Propriedades físicas da partícula utilizadas no trabalho de Wang *et al.* (2104).

Variável	Densidade real ρ_p (kg/m ³)	Densidade Volumétrica ρ_v (kg/m ³)	Velocidade mínima de fluidização U_{mf} (cm/s)	Diâmetro de partículas d (μm)
Valor	2650	1440	1,52	10 a 500

Fonte: WANG *et al.* 2014, p. 823

A Figura 6 ilustra a comparação entre as pressões e a fração volumétrica de sólidos obtidas experimentalmente e via simulação, em função da altura do sistema.

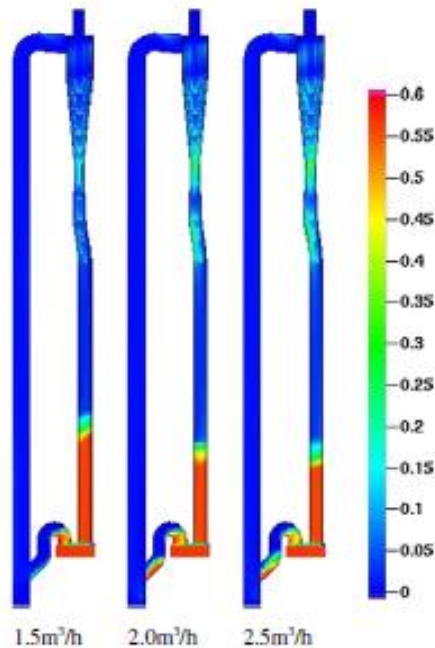
Figura 6 - Distribuição da pressão (a) e da fração de Volumes (b) em função da altura do sistema, apresentadas por Wang *et al.* (2104).



Fonte: WANG *et al.*, 2014, p. 825

A Figura 7 mostra os resultados das frações volumétricas de sólidos para diferentes aerações na válvula *loop-seal*. Wang *et al.* (2014) ainda relatam que a aeração deve ser cuidadosamente calculada, uma vez que está sendo realizada na câmara de alimentação, diretamente abaixo do *standpipe*, e que altos valores da vazão de gás poderiam fluidizar o mesmo, o que deve ser evitado para garantir estabilidade do sistema (WANG *et al.* 2014, p. 823).

Figura 7 - Distribuição da partícula em diferentes aerações na *loop-seal*



Fonte: WANG *et al.* 2014, p. 823

Zhao *et al.* (2015) realizaram um trabalho focado na simulação numérica da *loop-seal* sem a necessidade do desenho e malha do *riser* e do ciclone, considerando suas influências nas entradas de pressão nos pontos necessários. O estudo traz novamente a utilização de um modelo de minimização energética multi-escalar (EMMS), e uma geometria diferenciada para a válvula *loop-seal*. O principal objetivo do trabalho era a determinação de um índice de heterogeneidade por meio desse modelo EMMS (ZHAO *et al.* 2015, p. 443.).

O desenho da *loop-seal* foi realizado com cerca de 1,3 m de comprimento de *standpipe*, para suportar o inventário de partículas. Tanto a parte superior do *standpipe*, quanto a saída da *loop-seal* foram definidas como saídas com pressão especificada. O fluxo de sólidos na saída da *loop-seal* foi lido por meio de uma UDF (*user defined function*), e esse mesmo valor retornado ao sistema pela abertura na parte inferior do *standpipe*. (ZHAO *et al.* 2015, p. 445.).

As condições de operação e as propriedades das fases são mostradas na Tabela 6.

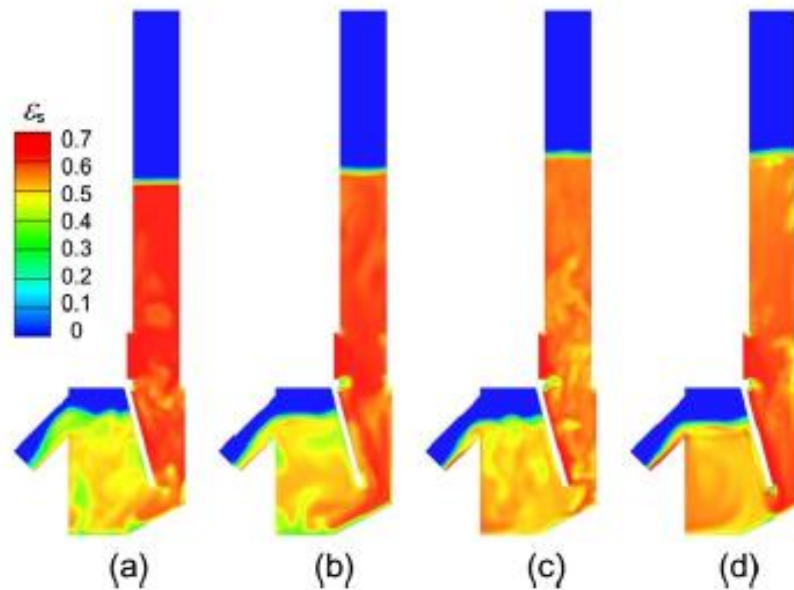
Tabela 6 - Condições de operação e propriedades das fases, apresentadas por Zhao *et al.* (2015).

Item	Gás	Partícula
Densidade (kg/m ³)	1,225	2460
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	1,7894e-5	/
Diâmetro (µm)	/	80,0
Coeficiente de Restituição	/	0,90
Limite máximo de empacotamento	/	0,63
Velocidade mínima de fluidização (m/s)	/	0,006

Fonte: ZHAO *et al.*, 2015, pag. 446

A Figura 8 mostra alguns dos resultados obtidos por Zhao *et al.* (2015). Nessa imagem pode-se observar a distribuição da fração de sólidos para diferentes modelos de arraste, quando comparados entre si. Vale ressaltar que para essa geometria diferenciada, a aeração da válvula *loop-seal* é dada pela região inclinada da parte inferior do desenho.

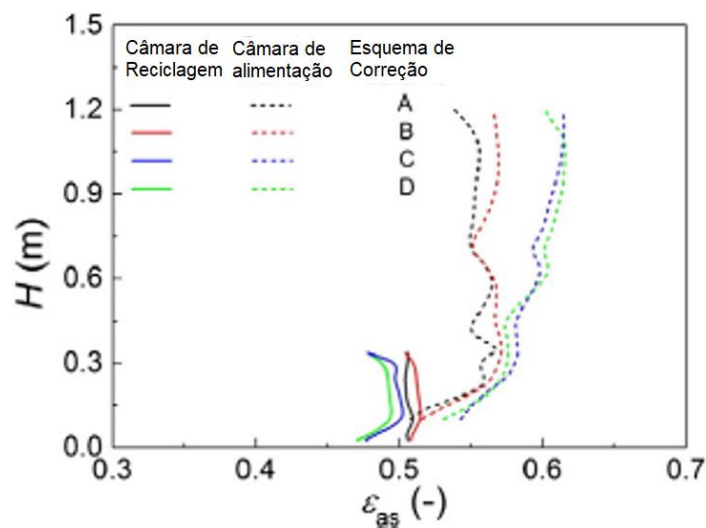
Figura 8 - Distribuição da fração de volume para diferentes modelos de arraste (a) Gidaspow Laminar (b) Gidaspow Turbulento, (c) EMMS laminar, (d) EMMS Turbulento, apresentada por Zhao *et al.* (2015).



Fonte: ZHAO *et al.* 2015, pag. 447

A concentração de sólidos em função da altura do geometria desenhada pode ser observada na Figura 9, onde os esquemas de correção A, B, C e D, se referem aos modelos da Figura 8.

Figura 9 - Concentração de sólidos média em função da altura do sistema, apresentada por Zhao *et al.* (2015).



Fonte: ZHAO *et al.* 2015, pag. 448.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos da metodologia apresentada foram separados em duas etapas, as quais fazem referência às simulações computacionais e aos experimentos realizados no sistema de LFC disponível em laboratório.

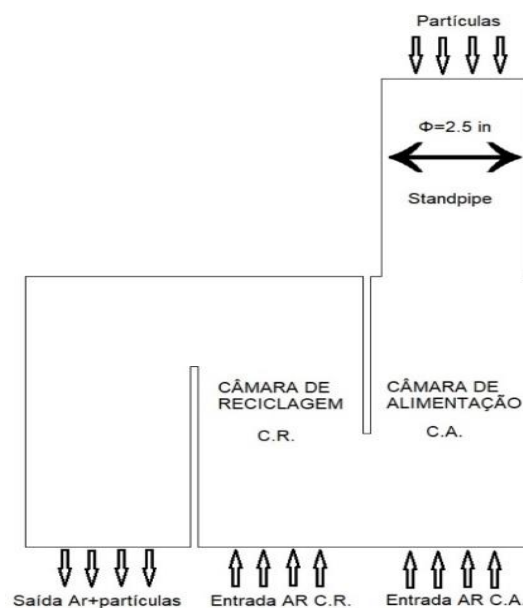
3.1. SIMULAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

3.1.1. Desenho da geometria e da malha

A primeira etapa do processo de simulação consistiu na definição do domínio de estudo ou volume de controle de interesse. Esse domínio foi desenhado com geometria tridimensional, representando fielmente a região já existente no sistema experimental de LFC.

Para o presente estudo, considerou-se apenas a válvula *loop-seal* e a porção do *standpipe* que abrange a superfície superior dos sólidos. Dessa forma, o desenho da geometria foi realizado com auxílio do programa ANSYS Design Modeler®, sendo representado na Figura 10.

Figura 10 –Geometria da válvula *loop-seal* do Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Ponta Grossa.



Fonte: Autoria Própria

Em relação à malha, esta corresponde à representação da divisão do domínio a ser simulado em volume de controles finitos, onde em cada volume gerado são realizados os cálculos respectivos de conservação de massa, momento e energia, arraste, entre outros. Quanto menor o tamanho, maior o número de volumes que podem ser contidos na malha, melhorando os resultados obtidos, uma vez que a malha se adequaria melhor à geometria proposta e trariam soluções para espaços mais próximos aos de uma condição infinitesimal. No entanto, um grande número de volumes apresenta a necessidade de poder computacional elevado, o que deve ser considerado ao se construir a malha.

Os *softwares* CAD (*Computer Aided Design*) em geral apresentam soluções para a o desenvolvimento das malhas computacionais. Para o projeto em questão, foi utilizado o software ANSYS MESH®.

3.1.2. Modelos e Equações do *Software*

A aproximação Euleriana-Euleriana realizada pelo *software* ANSYS FLUENT® v.18.2 envolve três principais modelos: Volume de Fluido (VOF), de Mistura e Euleriano.

O modelo de Volume de Fluido, descrito no manual ANSYS FLUENT®, é tratado para se rastrear a superfície de uma malha Euleriana usada para dois fluidos imiscíveis, onde se deseja ter informações sobre os pontos da interface entre os dois fluidos. Esse modelo é utilizado para simulações de escoamentos estratificados, preenchimento de recipientes, movimentos de grandes bolhas em líquidos, movimentos de líquidos após a quebra de represamentos, etc.

O modelo de Mistura é utilizado para 2 ou mais fases, sejam fluidas ou particuladas. Assim como no modelo Euleriano, as fases são tratadas como um *continuum*. Porém, esse modelo resolve as equações de momento para a mistura e obtém as velocidades relativas para descrever as partículas dispersas. Pode ser utilizado em escoamentos com muitas bolhas, simulações de ciclones, e sedimentação, entre outros.

Já, o modelo Euleriano, resolve várias equações de momento e continuidade para cada uma das fases. As fases podem se apresentar em praticamente qualquer

combinação. Uma única pressão é compartilhada por todas as fases. Ficam disponíveis funções de arraste, que regem as interações entre as fases, e também os modelos de turbulência $k-\varepsilon$.

As equações 13 a 19 são as principais equações utilizadas e resolvidas pelo ANSYS FLUENT®, para a realização da modelagem e simulação, fornecidas pelo seu manual.

Como descrito anteriormente, no modelo Euleriano é apresentado o conceito de fração de volume da fase q , dado por α_q . Dessa forma, o volume é definido por:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (13)$$

onde

$$\sum_q^n \alpha_q = 1 \quad (14)$$

A equação de conservação de massa é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{nq} - \dot{m}_{qn}) + S_q \quad (15)$$

onde \vec{v}_q é a velocidade da fase q , \dot{m}_{nq} a transferência de massa da n -ésima fase para a q -ésima fase e \dot{m}_{qn} a transferência de massa de q para n . O termo S_q é 0 para as configurações padrões do ANSYS FLUENT®, porém esse valor pode ser alterado manualmente.

A equação de conservação de momento para a fase q é dado por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \quad (16)$$

$$+ \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{np} + \dot{m}_{np} \vec{v}_{np} - \dot{m}_{pn} \vec{v}_{pn}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q})$$

onde $\bar{\tau}_q$ é o tensor de tensão dado por:

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I} \quad (17)$$

μ_q e λ_q representam a viscosidade volumétrica e de cisalhamento da fase q , \vec{F}_q representa uma força externa, $\vec{F}_{lift,q}$ uma força de sustentação e $\vec{F}_{vm,q}$ força de massa virtual. \vec{R}_{np} é a força de interação entre as fases n e q . ∇p representa o gradiente de pressão compartilhada pelas fases e \vec{v}_{np} representa a velocidade interfásica.

A conservação de energia é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q \cdot \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q \\ + \sum_{p=1}^n (Q_{np} + \dot{m}_{np} h_{np} - \dot{m}_{pn} h_{pn}) \end{aligned} \quad (18)$$

onde h_q é entalpia específica da q -ésima fase, \vec{q}_q o fluxo térmico, S_q é um recurso utilizado pelo ANSYS FLUENT® que inclui fontes de entalpia (para radiação ou possíveis reações químicas); Q_{np} é a intensidade de calor trocado entre a n -ésima fase e a q -ésima fase e h_{np} é a entalpia na interfase.

Por último, a equação de continuidade pela qual a fração de volume em cada fase é calculada é dada por:

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial (\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{np} - \dot{m}_{pn}) \quad (19)$$

sendo ρ_{rq} a densidade volumétrica média da q -ésima fase no domínio da solução. Essa equação deve ser resolvida em conjunto com a condição de que a soma das frações de volume deve ser igual 1.

3.1.3. Especificações da Simulação

Com base nos estudos teóricos, a simulação foi realizada com as condições de operação, condições de contorno, modelos e propriedades, descritas a seguir.

A simulação foi realizada por meio do *solver* baseado em pressão e no estado transiente, com informações do *setup* geral do ambiente do *software* ANSYS FLUENT®, v. 18.2. No link “Modelos”, ativou-se o modelo multifásico Euleriano, para duas fases e de formulação implícita.

Tendo sido realizado essa etapa, adicionou-se a segunda fase ao sistema, com as informações da partícula de areia descritas na tabelas 07 , bem como as demais definições para a interação entre as fases.

Tabela 07 – Propriedades da partícula de areia

Propriedades	Valores
Densidade (kg.m ⁻³)	2712
Calor específico (J.kg ⁻¹ K ⁻¹)	830
Condutividade Térmica (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	0,66

Fonte: Autoria Própria

Definidas as propriedades da partícula, deve-se indicar que a mesma corresponde à fase secundária do sistema, e que ela pertence à fase sólida, selecionando a opção “Granular”. Assim, as informações relativas à segunda fase foram as informadas na Tabela 08, onde as demais propriedades não citadas utilizaram valores padrões do ANSYS FLUENT®.

Tabela 08 – Propriedades para a fase secundária

Propriedades	Valores ou Funções
Diâmetro das partículas de areia (m)	0,000183
Viscosidade Granular (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	Gidaspow
Viscosidade Granular Volumétrica (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	Lun <i>et al.</i>
Limite máximo de empacotamento	0,55

Fonte: Aatoria Própria

Quanto à interação gás-partícula, a única variável alterada foi a do coeficiente de arraste, sendo, portanto, utilizado os modelos de Gidaspow, Syamlal – O'brien, Symmetric, Wen e Yu, e assim feita uma comparação entre os mesmos, a fim de se determinar qual o melhor modelo a ser utilizado.

As funções de arraste são equações que dependem de fatores como: número de Reynolds, fração volumétrica, densidade, diâmetro da partícula, e principalmente do coeficiente de arraste, calculado de forma diferente para cada um dos modelos, o que promove a diferença nos resultados.

As equações e descrições podem ser encontradas nas publicações referenciadas nesse trabalho: Gidaspow (GIDASPOW *et al.* p75-82, 1992), Syamlal – O'brien (SYAMLAL *et al.* p. 22-31, 1989), Wen e Yu (WEN e YU, p100-111, 1966) e por fim o Symmetric (ANSYS MANUAL, 2018).

As funções de arraste foram testadas para as condições do primeiro experimento (seção 3.2) e comparadas entre si e com os resultados experimentais em três quesitos: pressão nas câmaras de reciclagem e de alimentação, taxa de recirculação de sólidos, e por fim, por representação visual do comportamento fluidodinâmico.

As condições de contorno aplicadas estão descritas na Tabela 09 para cada uma das zonas identificadas pelo sistema, sem os valores específicos da aeração, uma vez que esses foram definidos pelos ensaios descritos na seção 3.2.2.

Tabela 09 – Condições de contorno para as zonas da malha simulada

Zona	Condição de contorno
Entrada câmara de reciclagem	<i>Mass flow inlet</i> (para o ar apenas)
Entrada câmara de alimentação	<i>Wall / Mass Flow Inlet</i> (para o ar apenas)
Paredes para a fase gasosa	<i>No-slip</i>
Paredes para a fase sólida	<i>Specularity coeficiente = 0,9</i>
Saída <i>loop-seal</i>	<i>Pressure Outlet</i>
Entrada standpipe	<i>Mass Flow Inlet</i> (para as partículas)

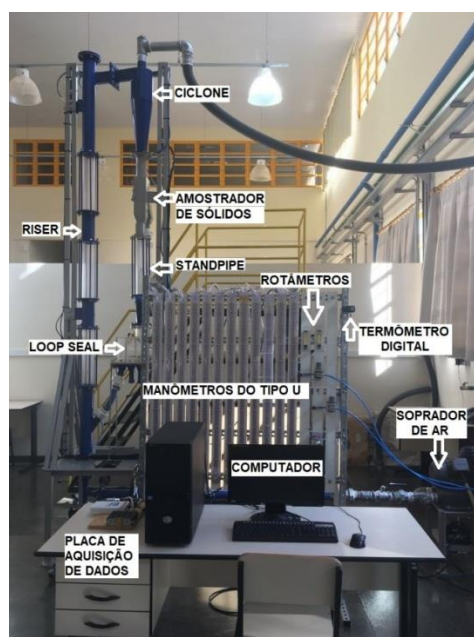
Fonte: Autoria Própria

Paras os métodos e controles de solução, foram utilizados os dados padrão do *software*.

3.2. EXPERIMENTOS NO SISTEMA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

O projeto em questão tem como base a análise do sistema de leito fluidizado circulante localizado no Laboratório de Processos Termodinâmicos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Campus Ponta Grossa, mostrado na Figura 11. A válvula *loop-seal* é detalhada na Figura 12.

Figura 11 - Leito Fluidizado Circulante do Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa



Fonte: Autoria Própria

Figura 12-Detalhe da *loop-seal* do LFC



Fonte: Autoria Própria

3.2.1 Materiais e equipamentos utilizados

Para a realização dos experimentos foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Areia de fundição;
- Balança de precisão SF-400;
- Compressor de ar SCHULTZ, CSA8,2/30 – PRATIC AIR
- Manômetros do tipo U;
- Leito Fluidizado Circulante com válvula *loop-seal*;
- Rotômetros OMEGA, FL2500;
- Soprador de ar AEROMACK, CRE-04;
- Placa de aquisição de dados NATIONAL INSTRUMENTS™, NI USB 6211

3.2.2. Operação e Coleta de Dados

Nos experimentos realizados no sistema de leito fluidizado circulante foram registradas leituras de pressão estática ao longo do circuito de fluidização e o valor da taxa de recirculação de sólidos no sistema.

Inicialmente, mediu-se a massa de areia do inventário utilizado. Essa massa foi introduzida ao *standpipe* e conseqüentemente na *loop-seal*, por meio da abertura localizada acima do ciclone. A simulação e os experimentos deste trabalho foram realizados considerando um inventário total de areia de 4 kg.

Uma vez abastecido o sistema, o soprador de ar foi colocado em operação, controlando-se sempre a velocidade de fluidização no *riser* até se alcançar a condição de equilíbrio na temperatura do gás alimentado ao sistema. Para o inventário utilizado e as propriedades da partícula, a velocidade de fluidização utilizada foi mantida constante no valor de 4 m/s, sendo esta suficiente para carregar as partículas de areia que passam da *loop-seal* para o *riser*.

O cálculo da velocidade de fluidização foi realizado com o auxílio de um programa elaborado no *software* comercial *Engineering Equation Solver*[®] (EES). A velocidade de fluidização é função da temperatura do ar e das pressões a montante e diferencial na placa de orifício, localizada entre o soprador e o *riser*.

Com a velocidade do gás no *riser* controlada, a aeração na válvula *loop-seal* é acionada na condição estabelecida para o respectivo experimento. A velocidade de fluidização precisa ser ajustada na sequência, uma vez que a presença da massa de partículas no *riser* produz uma resistência na passagem do ar de fluidização.

Os ensaios propostos, apresentados na Tabela 10, variam de acordo com a vazão volumétrica da aeração utilizada em cada câmara da válvula *loop-seal*.

Tabela 10 - Vazão volumétrica nas câmaras de reciclagem e alimentação para cada ensaio proposto

Experimento	Vazão na câmara de reciclagem (sL/min)	Vazão na câmara de alimentação (sL/min)
1	20	0
2	28	0
3	36	0
4	20	4
5	20	8
6	20	12

Fonte: Autoria Própria

A velocidade de fluidização no *riser* é mantida controlada em 4 m/s, já com as partículas em circulação e, assim que a temperatura do sistema se estabiliza novamente, inicia-se a coleta dos dados de pressão, sendo estes obtidos por meio dos respectivos transdutores e registrados pelo *software* LabView™, v. 2010 e a placa de aquisição de dados NATIONAL INSTRUMENTSTM, NI USB 6211. A aferição dos transdutores de pressão foi realizada previamente em conjunto com os manômetros de tipo U preenchidos com água destilada.

Uma vez registrados os dados de pressão, aciona-se o amostrador tipo borboleta localizado no *standpipe* coletou-se uma massa de areia por um determinado tempo utilizando. A massa coletada é medida, e devolvida ao sistema para não alterar seu inventário. Esse procedimento foi realizado para se determinar a taxa de recirculação dos sólidos (G_s), dado por:

$$G_s = \frac{m}{A_{sp} t} \quad (20)$$

onde G_s é expressa em kg/m².s.

Uma vez a massa coletada é devolvida ao sistema, esta volta a ser colocado em operação e mantido em regime estacionário. Assim, as medidas de pressão estática são aferidas mais uma vez, e uma nova coleta de amostra de partículas é realizada, porém em período de tempo menor. Os tempos de coleta de massa na amostragem de G_s corresponderam a 10 s, 8 s, 6 s, 4 s e 2 s.

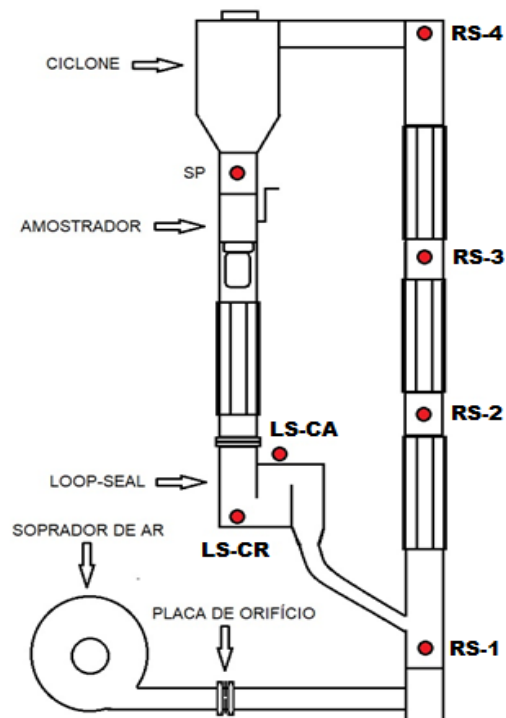
Com os valores de G_s para todos os tempos propostos, foi traçado um gráfico de G_s em função do tempo, a fim de se determinar a projeção da reta obtida sobre o eixo da ordenada. Com isso, conhece-se o valor projetado de G_s no tempo de 0 segundos, com o qual não seria alterado o inventário de sólidos do sistema.

3.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E TRATAMENTO DOS DADOS

A comparação dos resultados, com o fim de validar a simulação computacional realizada, foi feita com base nos valores registrados das pressões estáticas na válvula *loop-seal* e da taxa de recirculação dos sólidos.

Para as mesmas condições de aeração na válvula *loop-seal* utilizadas na simulação e nos experimentos, as pressões obtidas nos pontos LS-CR, LS-CA, mostrados na Figura 13, foram comparadas. Esses pontos foram escolhidos por serem os únicos pontos associáveis à simulação, uma vez que a mesma engloba apenas a *loop-seal* e parte do *standpipe*.

Figura 13 – Locais de tomada de pressão do LFC do Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa.



Quanto à taxa de recirculação dos sólidos, o valor do G_s projetado nos experimentos foi comparado com a média do valor de vazão mássica fornecido pelo programa ANSYS Fluent® v. 18.2, para a área de uma secção do *standpipe* na geometria desenhada. A validação será, portanto, conferida com base na aproximação entre os valores simulados e os obtidos experimentalmente, considerando-se para tal, os erros que possam ser introduzidos pelos próprios experimentos e pelas hipóteses assumidas para as condições físicas da simulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios experimentais, bem como as simulações realizadas.

Inicialmente, são tratados os resultados experimentais, de onde são extraídos dados essenciais para a simulação, de modo que a mesma possa ter condições de contorno o mais próximo possível da situação real.

Num segundo momento, são mostrados os resultados da malha construída e utilizada na simulação e as simulações preliminares, com o intuito de justificar a escolha do coeficiente de arraste utilizado nas simulações finais. Com isso, realiza-se a comparação final entre os resultados experimentais e os simulados. As principais comparações realizadas foram a taxa de recirculação de sólidos, G_s , e as pressões nos pontos LS-CA e LS-CR mostrados na Figura 13.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Conforme a sequência da aquisição de dados, inicialmente foram coletadas as pressões estáticas em cada um dos pontos descritos na Figura 13. Para cada um dos experimentos propostos, a taxa de recirculação de sólidos (G_s) foi aferida apenas após o fim das coletas das pressões.

A Tabela 11 abaixo mostra os resultados das pressões aferidas para o primeiro experimento, com uma taxa de aeração monocâmara de 20 sL/min inserida na câmara

de reciclagem. As pressões foram apresentadas em função da altura dos pontos de tomada de pressão, como uma forma padrão de comparação das quedas de pressão em leitos fluidizados circulantes.

Tabela 11 – Resultados das pressões para alimentação monocâmara de 20sL/min

PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA NA UFRAF		
Local do registro da pressão	Altura (m)	Pressão (mmH ₂ O)
Riser (RS-1)	0,030	81,0
Riser (RS-2)	1,005	72,0
Riser (RS-3)	2,165	58,0
Riser (RS-4)	2,675	49,0
Standpipe (SP)	2,105	24,0
Loop-seal - Alimentação (LS-CA)	0,705	229,0
Loop-seal - Reciclagem (LS-CR)	0,875	83,0
Re-entrada de sólidos (R-E)	0,200	82,0
QUEDAS DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DA UFRAF (mm H ₂ O)		
Componente	P _{final} - P _{inicial}	Identificação
RISER (acima da re-entrada)	-33,0	ΔP_f
CICLONE	-25,0	ΔP_c
STANDPIPE + LS-CAMARA ALIM.	205,0	ΔP_s
LS-CAMARA RECICLAGEM	-146,0	ΔP_r
TUBO DE RECICLAGEM	-1,0	ΔP_{rs}
VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE PRESSÃO		Cálculo (mmH ₂ O)
$\Delta P_f + \Delta P_c + \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_{rs} = 0$		0,0

Fonte: Autoria Própria

Todos os pontos de tomadas de pressão mostrados na Figura 13 estão relacionados na Tabela 11, com a adição de um novo ponto: Re-entrada de sólidos (R-E). O valor de pressão nesse local corresponde ao valor interpolado no trajeto das tomadas RS-1 e RS-2, na altura da reentrada dos sólidos.

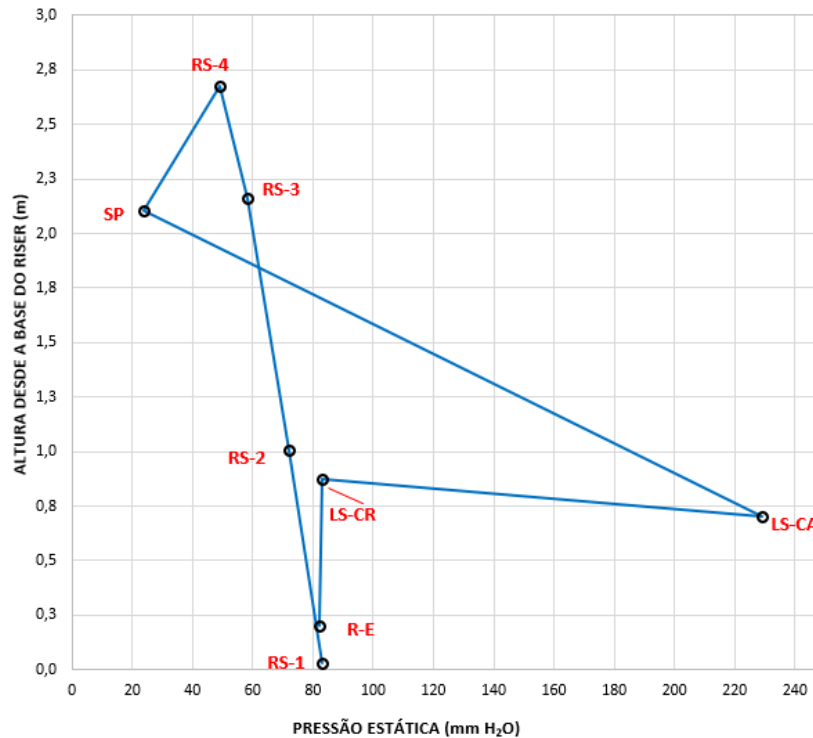
Além dos valores de pressão em cada um dos pontos, a tabela traz também o diferencial ou queda de pressão nos principais componentes do LFC. Assim, o balanço de pressão descrito na seção 2.2 do referencial teórico desse trabalho foi aplicado, a fim de verificar a validade dos resultados experimentais obtidos.

Vale ressaltar que na equação 01 aparece também o diferencial ΔP_g , a queda de pressão na abertura de passagem entre as câmaras de alimentação e de reciclagem. Porém, devido ao baixo valor desta grandeza, não há a necessidade de considerar o mesmo no balanço de pressão.

O Gráfico 01 traz a relação entre pressão estática e altura do sistema, de forma semelhante à mostrada na Figura 04 do trabalho de Nikolopoulos (2013, p.143). No

entanto, o trabalho deste autor mostra o gráfico em três dimensões, relacionando não apenas a altura, mas também a largura do leito.

Gráfico 01 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar monocâmara de 20 sL/min



Fonte: Autoria Própria

O perfil de pressão axial representado no Gráfico 01 mostra concordância entre os resultados dos experimentos e as informações da literatura. À medida que se avança na altura do *riser*, menor é a pressão axial, uma vez que a carga de sólidos suportada acima do local de medição diminui.

Entre o final do *riser* e o início do *standpipe* há uma queda de pressão semelhante à do *riser*, atribuída à separação dos sólidos feita no ciclone. Assim, devido ao acúmulo de sólidos na parte inferior do *standpipe* e câmara de reciclagem, o ponto LS-CA é o que apresenta o maior valor de pressão axial. Esse valor de pressão decresce rapidamente na parte superior da câmara de reciclagem, onde inicia a queda de sólidos para o tubo de reciclagem e, subsequente, para o *riser*.

Nas tabelas 12 e 13, são mostrados os resultados das pressões aferidas para os experimentos 2 e 3 da tabela 10, enquanto que os Gráficos 02 e 03 mostram os resultados dos perfis de pressão axial estática destes mesmos experimentos.

Tabela 12 – Pressões para injeção de ar monocâmara de 28 sL/min.

PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA NA UFRAF		
Local do registro da pressão	Altura (m)	Pressão (mmH ₂ O)
Riser (RS-1)	0,030	268,0
Riser (RS-2)	1,005	203,0
Riser (RS-3)	2,165	98,0
Riser (RS-4)	2,675	63,0
Standpipe (SP)	2,105	24,0
Loop-seal - Alimentação (LS-CA)	0,705	388,0
Loop-seal - Reciclagem (LS-CR)	0,875	255,0
Re-entrada de sólidos (R-E)	0,200	258,0
QUEDAS DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DA UFRAF (mm H ₂ O)		
Componente	P _{final} - P _{inicial}	Identificação
RISER (acima da re-entrada)	-230,0	ΔP_f
CICLONE	-39,0	ΔP_c
STANDPIPE + LS-CAMARA ALIM.	364,0	ΔP_s
LS-CAMARA RECICLAGEM	-133,0	ΔP_r
TUBO DE RECICLAGEM	38,0	ΔP_{rs}
VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE PRESSÃO		Cálculo (mmH ₂ O)
$\Delta P_f + \Delta P_c + \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_{rs} = 0$		0,0

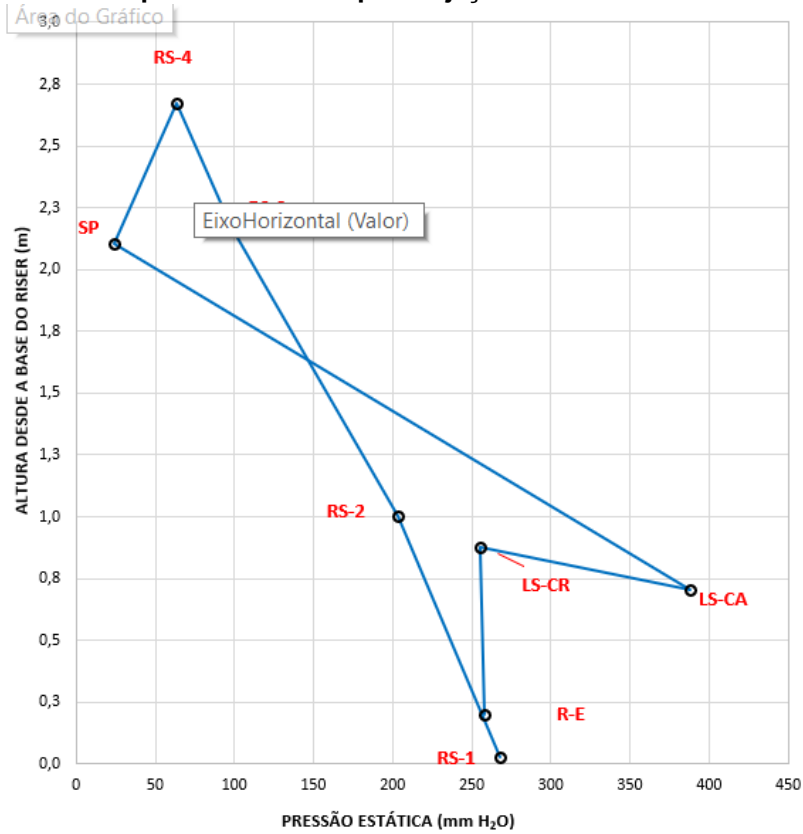
Fonte: Autoria Própria

Tabela 13 - Pressões para injeção de ar monocâmara de 36 sL/min.

PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA NA UFRAF		
Local do registro da pressão	Altura (m)	Pressão (mmH ₂ O)
Riser (RS-1)	0,030	298,0
Riser (RS-2)	1,005	234,0
Riser (RS-3)	2,165	111,0
Riser (RS-4)	2,675	68,0
Standpipe (SP)	2,105	24,0
Loop-seal - Alimentação (LS-CA)	0,705	408,0
Loop-seal - Reciclagem (LS-CR)	0,875	284,0
Re-entrada de sólidos (R-E)	0,200	291,0
QUEDAS DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DA UFRAF (mm H ₂ O)		
Componente	P _{final} - P _{inicial}	Identificação
RISER (acima da re-entrada)	-223,0	ΔP_f
CICLONE	-44,0	ΔP_c
STANDPIPE + LS-CAMARA ALIM.	384,0	ΔP_s
LS-CAMARA RECICLAGEM	-124,0	ΔP_r
TUBO DE RECICLAGEM	7,0	ΔP_{rs}
VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE PRESSÃO		Cálculo (mmH ₂ O)
$\Delta P_f + \Delta P_c + \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_{rs} = 0$		0,0

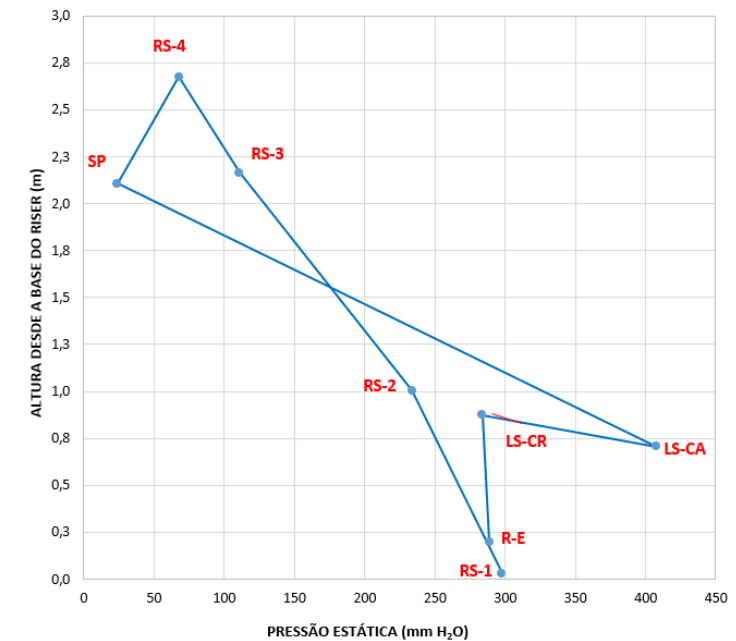
Fonte: Autoria Própria

Gráfico 02 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar monocâmara de 28 sL/min



Fonte: Autoria própria

Gráfico 03 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar monocâmara de 36 sL/min



Fonte: Autoria Própria

Ao observar os Gráficos 01 a 03 pode-se notar uma tendência no aumento da inclinação do trajeto entre os pontos RS-1 a RS-4 à medida que a taxa de aeração na

câmara de reciclagem cresce. Portanto, verifica-se que, quanto maior a aeração, maior a perda de carga no *riser*.

A maior perda de pressão no *riser* justifica-se pelo aumento da massa de partículas depositada na coluna, bem como pelo aumento na taxa de recirculação de sólidos (G_s) que produz maior atrito nas paredes.

As Tabelas 14 a 16 mostram os resultados para os testes com injeção de ar em ambas as câmaras da *loop-seal* (aeração bicâmara), sendo estes os experimentos 4 a 6 da Tabela 10. Os Gráficos 04 a 06 mostram os perfis axiais de pressão estática para estes experimentos.

Tabela 14 - Pressões para injeção de ar bicâmara, de 16 sL/min na CR e 4 sL/min na CA.

PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA NA UFRAF		
Local do registro da pressão	Altura (m)	Pressão (mmH ₂ O)
Riser (RS-1)	0,030	111,9
Riser (RS-2)	1,005	93,3
Riser (RS-3)	2,165	60,4
Riser (RS-4)	2,675	44,0
Standpipe (SP)	2,105	39,2
<i>Loop-seal</i> - Alimentação (LS-CA)	0,705	287,1
<i>Loop-seal</i> - Reciclagem (LS-CR)	0,875	110,6
Re-entrada de sólidos (R-E)	0,200	111,3
QUEDAS DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DA UFRAF (mm H ₂ O)		
Componente	P _{final} - P _{inicial}	Identificação
RISER (acima da re-entrada)	-67,3	ΔP_f
CICLONE	-4,8	ΔP_c
STANDPIPE + LS-CAMARA ALIM.	247,9	ΔP_s
LS-CAMARA RECICLAGEM	-176,5	ΔP_r
TUBO DE RECICLAGEM	0,7	ΔP_{rs}
VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE PRESSÃO		Cálculo (mmH ₂ O)
$\Delta P_f + \Delta P_c + \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_{rs} = 0$		0,0

Fonte: Autoria Própria

Tabela 15 - Pressões para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 12sL/min na CA.

PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA NA UFRAF		
Local do registro da pressão	Altura (m)	Pressão (mmH2O)
Riser (RS-1)	0,030	301,0
Riser (RS-2)	1,005	233,9
Riser (RS-3)	2,165	104,9
Riser (RS-4)	2,675	59,7
Standpipe (SP)	2,105	38,8
Loop-seal - Alimentação (LS-CA)	0,705	473,7
Loop-seal - Reciclagem (LS-CR)	0,875	285,9
Re-entrada de sólidos (R-E)	0,200	293,5
QUEDAS DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DA UFRAF (mm H2O)		
Componente	P _{final} - P _{inicial}	Identificação
RISER (acima da re-entrada)	-233,8	ΔP_f
CICLONE	-20,9	ΔP_c
STANDPIPE + LS-CAMARA ALIM.	434,9	ΔP_s
LS-CAMARA RECICLAGEM	-187,8	ΔP_r
TUBO DE RECICLAGEM	7,6	ΔP_{rs}
VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE PRESSÃO		Cálculo (mmH2O)
$\Delta P_f + \Delta P_c + \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_{rs} = 0$		0,0

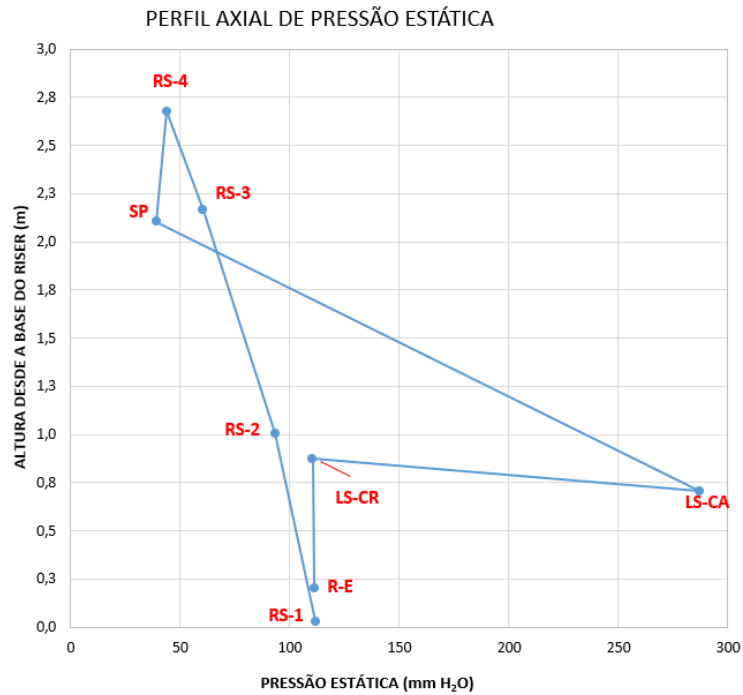
Fonte: Autoria Própria

Tabela 16 - Pressões para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 20sL/min na CA.

PERFIL DE PRESSÃO ESTÁTICA NA UFRAF		
Local do registro da pressão	Altura (m)	Pressão (mmH2O)
Riser (RS-1)	0,030	314,7
Riser (RS-2)	1,005	242,0
Riser (RS-3)	2,165	101,3
Riser (RS-4)	2,675	58,6
Standpipe (SP)	2,105	39,1
Loop-seal - Alimentação (LS-CA)	0,705	488,5
Loop-seal - Reciclagem (LS-CR)	0,875	297,9
Re-entrada de sólidos (R-E)	0,200	306,3
QUEDAS DE PRESSÃO NOS COMPONENTES DA UFRAF (mm H2O)		
Componente	P _{final} - P _{inicial}	Identificação
RISER (acima da re-entrada)	-247,7	ΔP_f
CICLONE	-19,5	ΔP_c
STANDPIPE + LS-CAMARA ALIM.	449,4	ΔP_s
LS-CAMARA RECICLAGEM	-190,6	ΔP_r
TUBO DE RECICLAGEM	8,4	ΔP_{rs}
VERIFICAÇÃO DO BALANÇO DE PRESSÃO		Cálculo (mmH2O)
$\Delta P_f + \Delta P_c + \Delta P_s + \Delta P_r + \Delta P_{rs} = 0$		0,0

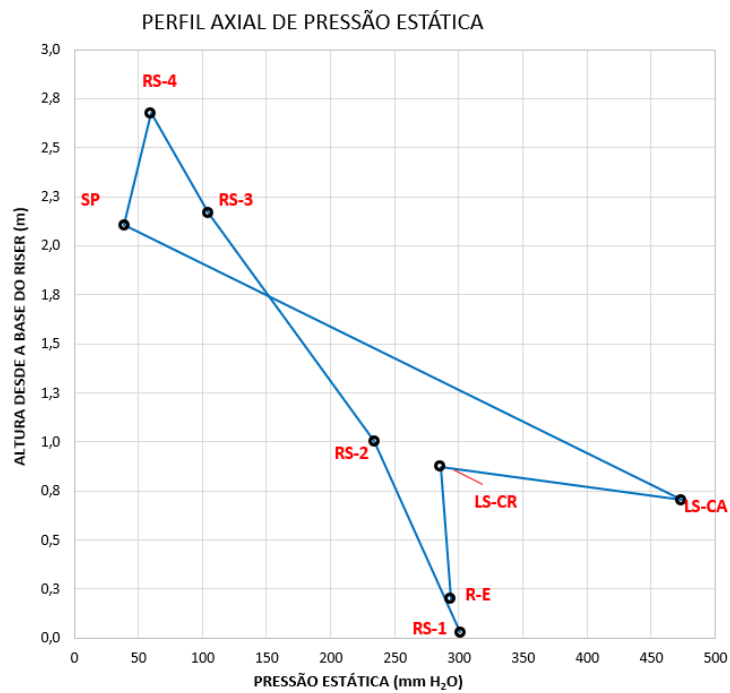
Fonte: Autoria Própria

Gráfico 04 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar bicâmara, de 16 sL/min na CR e 4 sL/min na CA.



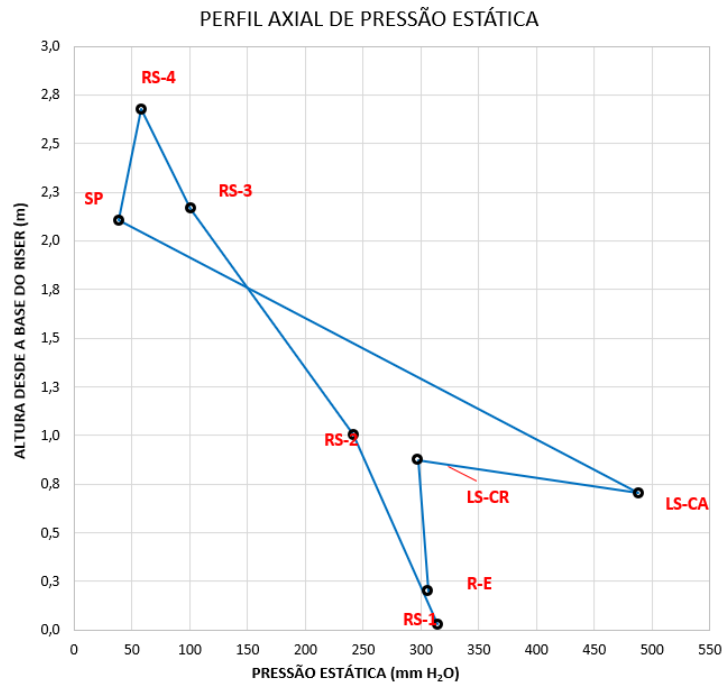
Fonte: Autoria Própria

Gráfico 05 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 12sL/min na CA.



Fonte: Autoria Própria

Gráfico 06 – Perfil axial de pressão estática para injeção de ar bicâmara, de 16sL/min na CR e 20sL/min na CA.



Fonte: Autoria Própria

Com base nas tabelas 14 a 16 e gráficos 04 a 06, pode-se observar o mesmo comportamento descrito anteriormente, em relação aos diferenciais de pressão e a influência da aeração total no diferencial de pressão no *riser*. No entanto, um aspecto que se destaca é a pressão máxima atingida pelo sistema.

No sistema de aeração bicâmara, para uma mesma taxa total de aeração, tem-se pressões mais elevadas para todos os pontos do sistema, quando comparados com os da injeção de ar monocâmara. Esse comportamento irá afetar de forma direta na taxa de recirculação de sólidos (G_s).

Como já descrito na seção 3.2.2, após o aferimento das pressões, as coletas das partículas que passaram pelo *standpipe* foi realizada em diferentes intervalos de tempo, a fim de se determinar a taxa real de recirculação de sólidos projetada para um tempo de coleta nulo.

A tabela 17 traz os valores de taxa de recirculação de sólidos (G_s), calculada pela equação 20 da seção 3.2.2.

Tabela 17 – Valores de G_s obtidos dos experimentos

Experimento	Aeração CA (sL/min)	Aeração CR(sL/min)	G_s (kg/m ² .s)
1	0	20	11,24
2	0	28	29,96
3	0	36	33,71
4	4	16	13,46
5	12	16	33,71
6	20	16	37,49

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 17 permite realizar algumas observações que relacionam o incremento da aeração com a quantidade de sólidos reciclados no sistema. O primeiro ponto a ser relatado é que, conforme esperado, o aumento da vazão da aeração, seja no modo monocâmara quanto no bicâmara, promove o aumento do G_s , o que está de acordo com a literatura.

No entanto, é importante observar que, apesar dos incrementos da taxa de aeração serem constantes, sempre de 8 em 8 sL/min, o aumento na taxa de recirculação não é proporcional. Isso mostra tendência ao aparecimento de um limite no valor máximo de G_s com o aumento na taxa da aeração. A limitação surge devido à diminuição na massa de sólidos acumulada no *standpipe*, uma vez que ao cair o nível de sólidos pelo incremento da aeração, a força do movimento criada na *loop-seal* fica restrita ao peso cada vez menor das partículas. Na prática, uma maior quantidade de areia no sistema representa uma maior capacidade de reciclagem, podendo aumentar o patamar do G_s máximo.

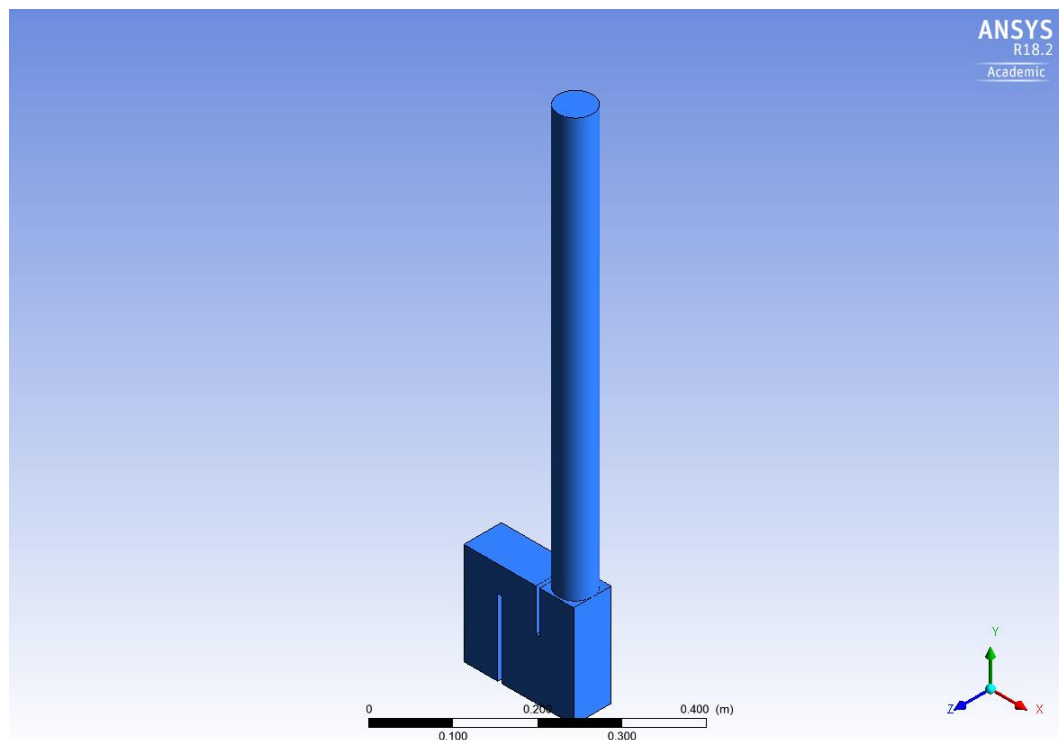
Outro ponto relevante a ser discutido é o fato de que, na aeração bicâmara, por mais que a vazão de ar total seja igual aos dos experimentos em modo monocâmara, a taxa de recirculação é significativamente maior. Dessa forma, pode-se estabelecer também, o tipo de alimentação (bicâmara e monocâmara) como fator determinante no valor da taxa de recirculação de sólidos, bem como no máximo G_s que pode ser obtido pelo sistema.

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

4.2.1 Construção da Geometria e malha

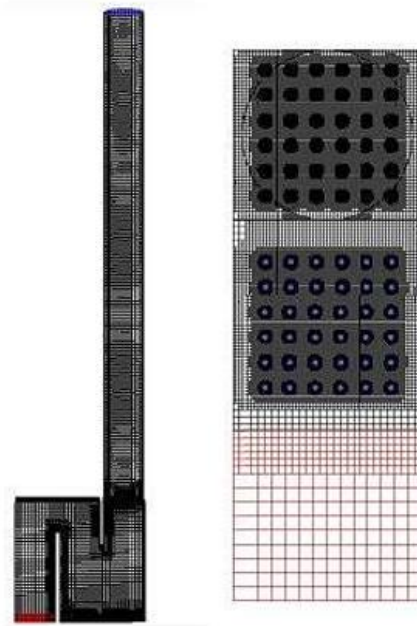
Para as simulações em questão, foram utilizados os *softwares* ANSYS DesignModeler® para a construção da geometria (Figura 14) e ANSYS MESH® para construção da malha estrutural (Figura 15).

Figura 14 – Geometria construída via *software* ANSYS DesignModeler®



Fonte: Autoria Própria

Figura 15 – Malha construída via *software ANSYS MESH*®



Fonte: Autoria Própria

O principal objetivo do trabalho em questão é o da simulação computacional da válvula *loop-seal*, o que não requer o desenho completo do leito fluidizado circulante, mas apenas o da válvula em si e do *standpipe*. Isto porque os sólidos que se acumulam no mesmo são fatores determinantes nos valores de pressão obtidos nos resultados simulados.

Essa simplificação para uma menor geometria leva a economia de processamento requerido para a realização das simulações. Uma maior geometria representando o sistema completo iria precisar de uma malha mais refinada, isto é, com maior número de volumes de controle, demandando tempo de simulação excessivo nos computadores disponíveis.

A malha criada possui 315.215 células, ou volumes de controle. A qualidade da malha foi avaliada mediante quatro indicadores principais: ângulo máximo, assimetria, qualidade ortogonal e *aspect ratio*.

O ângulo máximo está relacionado com a deformidade das faces dos volumes de controle construídos. Para as malhas do tipo QUAD, utilizada na Figura 15, o ideal

é que esse valor permaneça em 90° , indicando um quadrilátero regular normal. Para a malha em questão, a média final foi de $90,535^\circ$, sendo um valor excelente, demonstrando uma deformidade praticamente inexistente nos quadriláteros.

A assimetria mostra o alongamento desses quadriláteros, onde o mais interessante é que os mesmos permanecessem na forma de um quadrado. O mesmo é calculado pelo erro entre o tamanho observado e o tamanho ótimo. Assim, quanto mais perto de 0, melhor o resultado. A malha projetada apresentou uma assimetria média de 0,011639, sendo um resultado muito perto do valor nulo.

A qualidade ortogonal é dada pelo vetor normal da face, o vetor do centro de uma célula ao centro de outra adjacente, e também do vetor do centro de uma célula até o início da célula adjacente. Seus valores de avaliação vão de 0 a 1, sendo 1 o melhor resultado possível. A malha construída apresentou uma qualidade ortogonal média de 0,96294.

Por fim, o *aspect ratio*, dado pelo razão entre a área da célula sobre o comprimento da maior aresta que compõe a face foi avaliado. Os guias de construção de malha e o manual do ANSYS, relatam que o ideal é esse valor ser o menor possível, sendo aceitável até o valor de 100. Para a malha em questão, o *aspect ratio* médio observado foi de 1,0569.

Dessa forma, é seguro afirmar que a malha construída apresenta valores satisfatórios e que podem garantir uma melhor qualidade dos resultados a serem apresentados.

4.2.2 Uso de *User-Defined Functions* (UDF)

Para a realização das simulações, as especificações citadas na seção 3.1.3 foram seguidas de modo a determinar as propriedades da partícula de areia e da mesma como fase secundária em uma mistura ar-areia. Em conjunto com essas definições havia ainda a necessidade de garantir que o sistema pudesse ter uma certa continuidade em relação ao tempo, sem que acabasse o inventário de sólidos na geometria desenhada.

No sistema experimental, considerando o leito fluidizado completo, a areia que sai da câmara de reciclagem irá eventualmente retornar para a *loop-seal*, e para tanto era preciso garantir essa mesma condição para a simulação. Idealmente, a mesma quantidade de areia que sai da *loop-seal* deveria estar retornando para a mesma.

De modo a garantir essa condição, foi necessário aplicar um recurso provido pelo ANSYS®, que são as Funções Definidas pelo Usuário, *user-defined functions* (UDF). Por meio de programação computacional, com conhecimento de macros pré-definidos pelo ANSYS®, é possível se comunicar com o *software* e lhe dar comandos que não são acessíveis via console normal do programa.

A Figura 16 mostra a UDF utilizada para garantir a manutenção da massa de sólidos dentro da *loop-seal*.

Figura 16 – UDF criada para garantir a preservação da massa de sólidos na *loop-seal*

```
#include "udf.h"

real flow = 0.;

DEFINE_ADJUST(mass_flux_par,d)
{
    face_t f;
    Thread *tf;
    d = Get_Domain(3);
    tf = Lookup_Thread(d, 8);

    flow = 0.;

    begin_f_loop(f,tf)
    {
        flow += F_FLUX(f,tf);
    }
    end_f_loop(f,tf)

    flow = PRF_GRSUM1(flow);
}

DEFINE_PROFILE(set_mass_reflux_par,tf,i)
{
    face_t f;
    begin_f_loop(f,tf)
    {
        F_PROFILE(f,tf,i) = flow/(3.1415*0.057*0.057/4);
    }
    end_f_loop(f,tf)
}
```

Fonte: Autoria Própria baseado em MARTINS (2015)

A UDF em questão encontra-se dividida em dois *threads*. Entende-se por *threads* comandos principais que o compilador deverá comunicar ao simulador. Esses comandos são definidos por cálculos e aquisição de dados, de acordo com a necessidade do *thread* em si. *Threads* podem ser computadas ao mesmo tempo ou sequencialmente umas às outras.

Os *threads* são determinados por macros, que são funções escritas de forma que o simulador possa compreendê-las. O primeiro *thread* é um macro do tipo *define_adjust*. Segundo o ANSYS MANUAL, macros do tipo *define_adjust* têm o propósito geral de ajustar ou modificar variáveis no Fluent. O *thread* em questão foi criado para definir a variável *flow*, de modo que ela possuísse o valor do fluxo mássico observado na saída da *loop-seal*.

O segundo *thread* é um macro do tipo *define_profile*, usado para definir o perfil de uma fronteira ou uma condição de uma célula que varie com o tempo. No caso em questão, a função desse *thread* é fazer com que o valor associado à variável *flow* seja aplicado na entrada do *standpipe*, em outro ponto da geometria, completamente diferente de onde a variável *flow* foi lida.

De forma resumida, pode-se dizer que a UDF da Figura 16 lê o valor de taxa de areia que está saindo da câmara de reciclagem e introduz esse mesmo valor na entrada do *standpipe*. Dessa forma, é possível garantir a manutenção do inventário de sólidos no sistema, sem afetar de forma considerável os resultados da simulação.

A UDF foi escrita com auxílio do *software* Microsoft Visual Studio Express 2017®, *software* necessário para a compilação e comunicação com o ANSYS Fluent®. O código fonte foi baseado no trabalho realizado por MARTINS (2015).

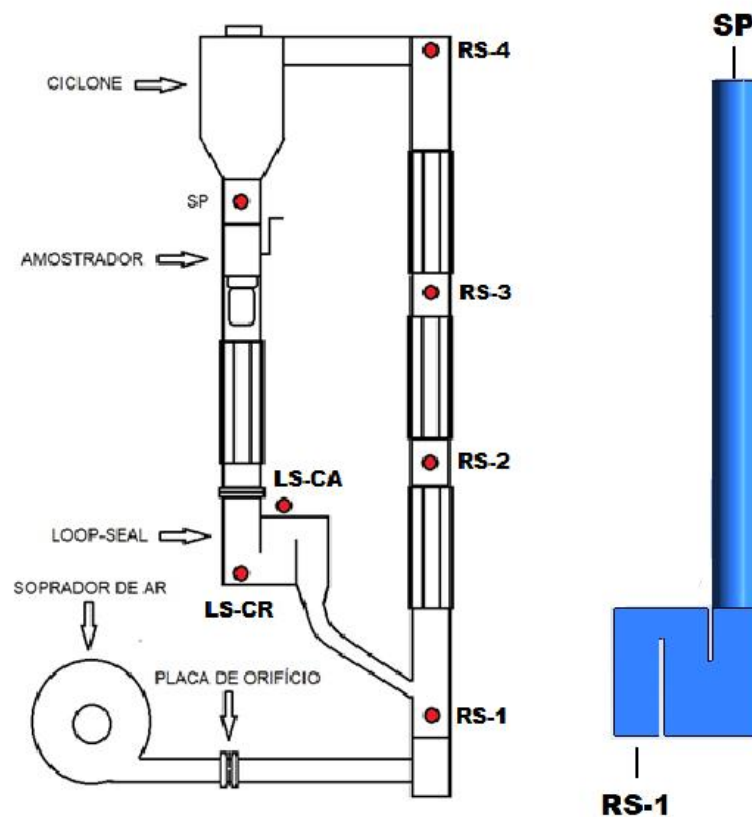
4.2.3 Condições de Contorno Aplicadas

Para que as simulações possam representar os fenômenos de interesse com maior fidelidade em relação aos resultados experimentais, é necessário que as condições de contorno sejam as mais próximas possíveis daquelas utilizadas no ambiente ao qual o sistema experimental foi submetido. As principais condições de contorno foram as pressões em locais extremos da *loop-seal*, a aeração da câmara

de reciclagem e de alimentação, e a determinação da região ocupada pelos sólidos na geometria.

Em relação as pressões, uma vez que o sistema simulado não representa o leito fluidizado na sua totalidade, e sim apenas parte dele, alguns dos resultados obtidos experimentalmente serão utilizados para determinar as pressões em 2 pontos específicos (Figura 17):

Figura 17 – Representação das pressões consideradas para a realização da simulação.



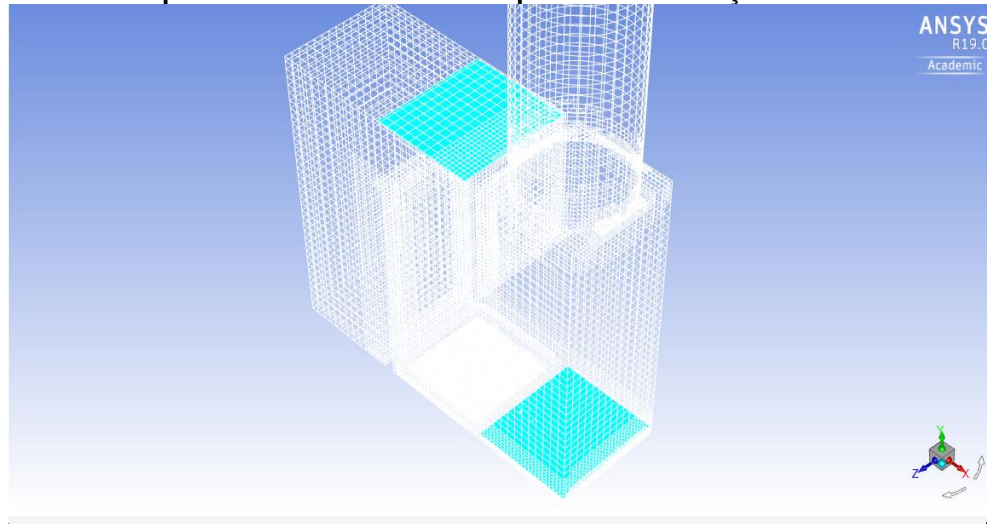
Fonte: Autoria Própria

De modo a garantir uma proximidade com a situação real, os valores de RS-1 e SP dos Experimentos 01 a 06, mostrados nas tabelas 11 a 16, foram utilizados nas respectivas simulações, nos pontos indicados na figura 17.

Já, os pontos LS-CA e LS-CR são os pontos que foram usados, a fim de comparação dos resultados. Para isso, houve a necessidade da criação de planos na malha em pontos próximos ao ponto de coleta real no aparato experimental, Figura 18.

A partir desses planos, foi dado o comando para que o programa calcule a pressão média no plano em questão. Os valores calculados foram dados em Pascal, unidade para qual a pressão obtida experimentalmente deverá ser convertida a fim de comparação.

Figura 18 – Planos em que foram feitos os cálculos de pressão na simulação.



Fonte: Autoria Própria

Quanto à aeração nas câmaras de reciclagem e alimentação, a equação 21 mostra a expressão que relaciona a vazão lida no rotâmetro, de sL/min com a vazão real em sL/min, de acordo com o manual do fabricante OMEGA:

$$Leitura\ Rot\hat{a}metro = Valor\ Real * \sqrt{\frac{(SG)(T_o)(14.7)}{(1.0)(530)(P_o)}} \quad (21)$$

onde, SG é a gravidade específica do ar, T_o a temperatura nas condições de operação, P_o a pressão absoluta de trabalho.

A equação 22 mostra a equação requerida para converter a vazão de sL/min para L/min, apenas introduzindo a equação universal dos gases ideais ($PV=nRT$) para as condições reais e padrão:

$$[L/min] = \frac{[sL/min]}{\left(\frac{p[bar]273,15K}{(273,15+T[^{\circ}C]).1,01325 \text{ bar}}\right)} \quad (22)$$

Uma vez que a entrada de ar na simulação deve ser definida ou pela velocidade ou pela vazão mássica, escolhendo a última opção ainda é necessário converter o valor de L/min para kg/s, com base na massa específica do ar na temperatura de trabalho. O tabela 18 mostra o resultado dos valores relatados.

Tabela 18 – Valores convertidos das vazões de alimentação de ar na loop-seal.

Exp.	CA (sL/min)	CR (sL/min)	Aeração				CA (kg/s)	CR(kg/s)	Gs (kg/m ² .s)
			CA (sL/min) real	CR (sL/min) real	CA (L/min)	CR (L/min)			
1	0	20	0	35,8	0	12,3	0	2,43E-04	11,24
2	0	28	0	50,2	0	17,2	0	3,41E-04	29,96
3	0	36	0	64,5	0	22,1	0	4,38E-04	33,71
4	4	16	7,2	28,7	2,5	9,8	4,87E-05	1,95E-04	13,46
5	12	16	21,5	28,7	7,4	9,8	1,46E-04	1,95E-04	33,71
6	20	16	35,8	28,7	12,3	9,8	2,43E-04	1,95E-04	37,49

Fonte: Autoria Própria

Por último, tem-se a determinação da região ocupada pela fase sólida. Devido ao fato da geometria em questão não representar o sistema em sua totalidade, seria necessário prover condições para que a quantidade de areia dentro da geometria fosse o mais próxima possível da experimental.

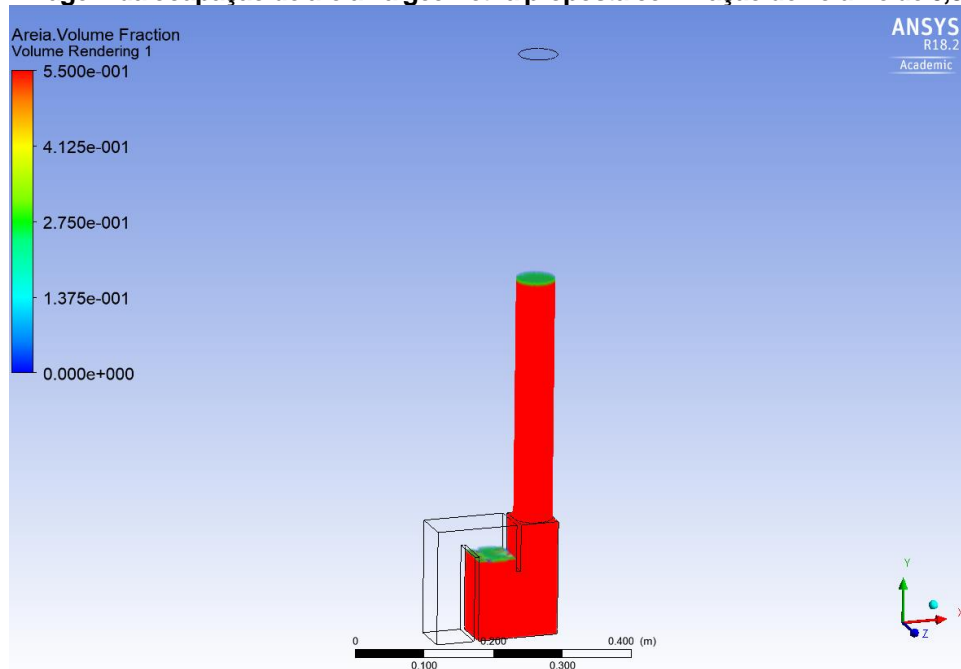
Tendo em vista um inventário de 4kg, estimou-se que durante a operação do leito fluidizado circulante, cerca de 25% desse inventário estaria passando pelo tubo de reciclagem, *riser* e ciclone. Sendo assim, foi considerado que apenas 3 kg estariam dentro da geometria desenhada. Esses números foram obtidos com base na interrupção simultânea da alimentação de ar na *loop-seal* e na coluna *riser*, de modo que a massa de sólidos fosse assim recolhida e pesada separadamente. As medições

mostraram valores ao redor de 75% do inventário no conjunto *loop-seal + standpipe*, e 25% no *riser*.

Dessa forma, a fim de fornecer a informação ao *software*, foi utilizada a ferramenta *define region*, do próprio simulador. Ali é possível fornecer as coordenadas da geometria que devem ser ocupadas por uma determinada fase (ar ou areia), bem como o valor da fração volumétrica de uma fase em relação a outra.

A fração volumétrica varia de 0 a 1, sendo 1 um valor que representa a presença apenas daquela fase. A fim de se representar os 3 kg de areia na geometria, foi calculado o volume que essa massa ocuparia, considerando uma fração volumétrica hipotética de 0,55. Assim, esse volume foi redirecionado para o formato da geometria em si, obtendo-se a Figura 19.

Figura 19 – Imagem da ocupação de areia na geometria proposta com fração de volume de 0,55.



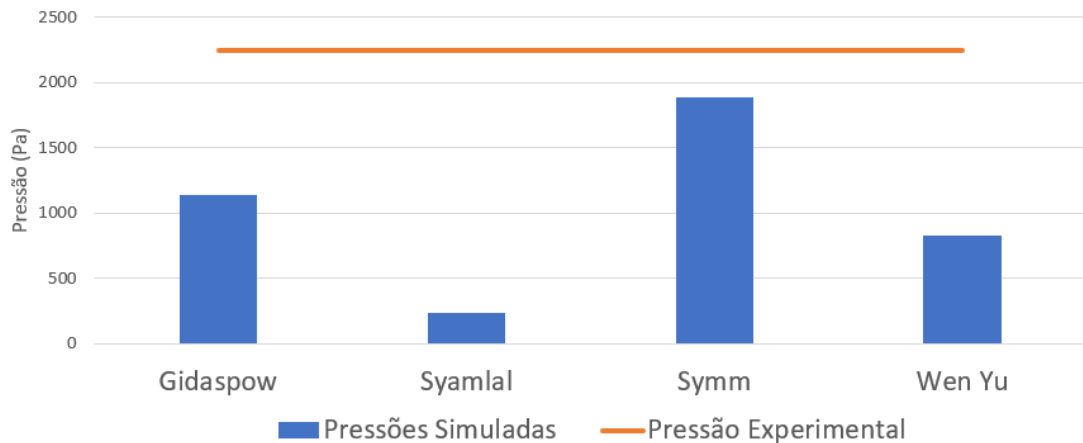
Fonte: Autoria Própria

4.2.4 Escolha do Modelo de Arraste

Conforme descrito na seção 3.1, a determinação do modelo de arraste foi dada com base na comparativa entre os resultados de todos os modelos testados com os resultados experimentais, em 3 quesitos diferentes: Pressão, G_s e visualização do comportamento fluidodinâmico.

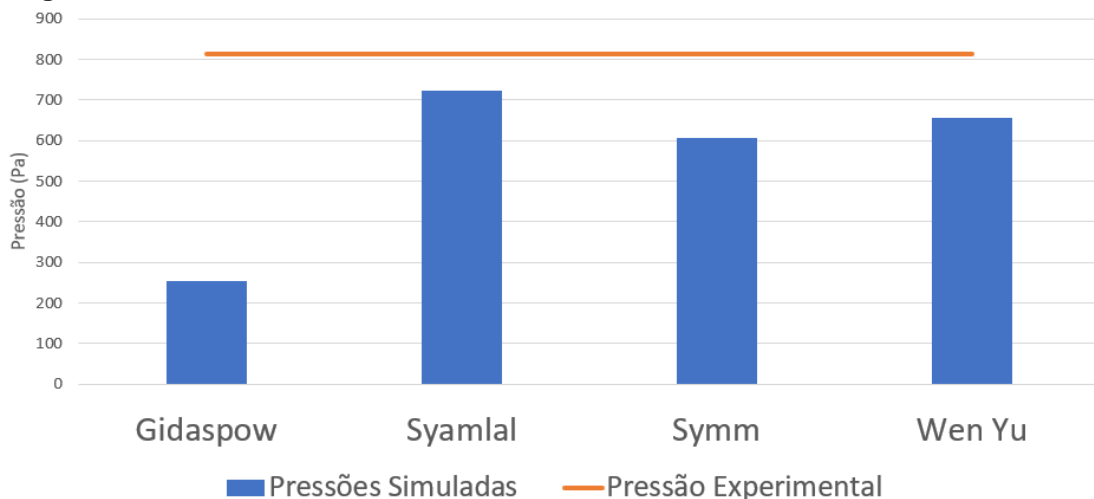
Os Gráfico 07 e 08, mostram os resultados dos valores de pressão encontrados na câmara de alimentação e na câmara de reciclagem, respectivamente, para as funções de arraste representadas no eixo x, considerando o primeiro experimento proposto (vazão de 20sL/min na câmara de reciclagem). A linha alaranjada do gráfico mostra o resultado experimental dessas pressões, para fim de comparação.

Gráfico 07 – Comparação entre as pressões simuladas e experimental na câmara de alimentação



Fonte: Autoria Própria

Gráfico 08 – Comparação entre as pressões simuladas e a experimental na Câmara de Reciclagem



Fonte: Autoria Própria

Como pode-se observar, para a câmara de alimentação, o valor simulado que mais se aproximou do real foi o do modelo *Symmetric*. Os demais modelos obtiveram uma pressão muito abaixo do esperado. No entanto, para a câmara de Reciclagem,

os modelos Wen Yu e Syamlal se aproximaram mais do valor real do que o modelo *Symmetric*.

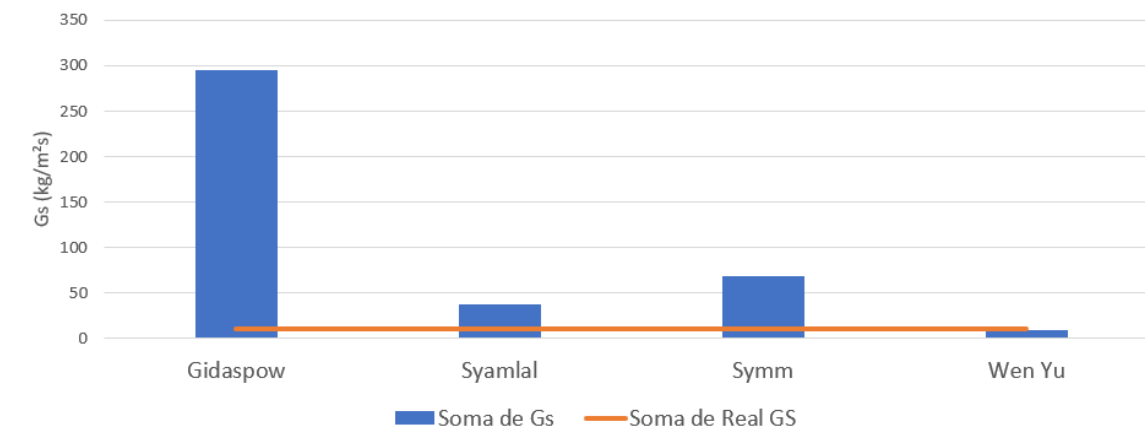
No entanto é importante ressaltar que, nas condições de operações do leito fluidizado circulante, a pressão na câmara de reciclagem nunca será maior do que a pressão na câmara de alimentação, como observado nos resultados experimentais mostrados nas seções anteriores. Sendo assim, apesar da aproximação dos resultados de Syamlal para a câmara de reciclagem, esses valores estão maiores do que os da câmara de alimentação, tornando-o inviável.

Outro aspecto, trata-se da diferença entre os resultados das pressões para o modelo Wen e Yu. Apesar da coerência pelo fato da pressão na câmara de alimentação ser superior ao da câmara de reciclagem, essa diferença é muito pequena, cerca de 200 Pa, bem diferente do que os resultados experimentais mostram, onde essa diferença é maior.

Em contra partida, para o modelo de Gidaspow, existe a coerência no fato da pressão na câmara de alimentação ser maior do que na câmara de reciclagem, com os valores possuindo uma diferença significativa, como esperado. No entanto, em comparação com o modelo *Symmetric*, este último se aproxima mais dos valores experimentais. Dessa forma, o *Symmetric* continua sendo o mais coerente dentre os 3. Assim, no quesito pressão, o modelo *Symmetric* se mostrou o mais adequado.

Para o quesito taxa de recirculação de sólidos, os resultados foram arranjados de forma semelhante, sendo apresentados no Gráfico 09.

Gráfico 09 – Comparação entre o Gs simulado e o experimental



Fonte: Autoria Própria

No que se refere ao G_s , nota-se que o modelo Wen e Yu foi o que mais se aproximou do valor real, com grandes variações para os demais modelos. Portanto, para o quesito taxa de recirculação de sólidos, G_s , o modelo Wen e Yu é o mais adequado.

Por último, em termos de aproximação visual, a Figura 20 traz um comparativo do resultado das frações de volume em um mesmo tempo para todas as simulações, e uma imagem do escoamento gás-sólido real do experimento, para fim de comparação.

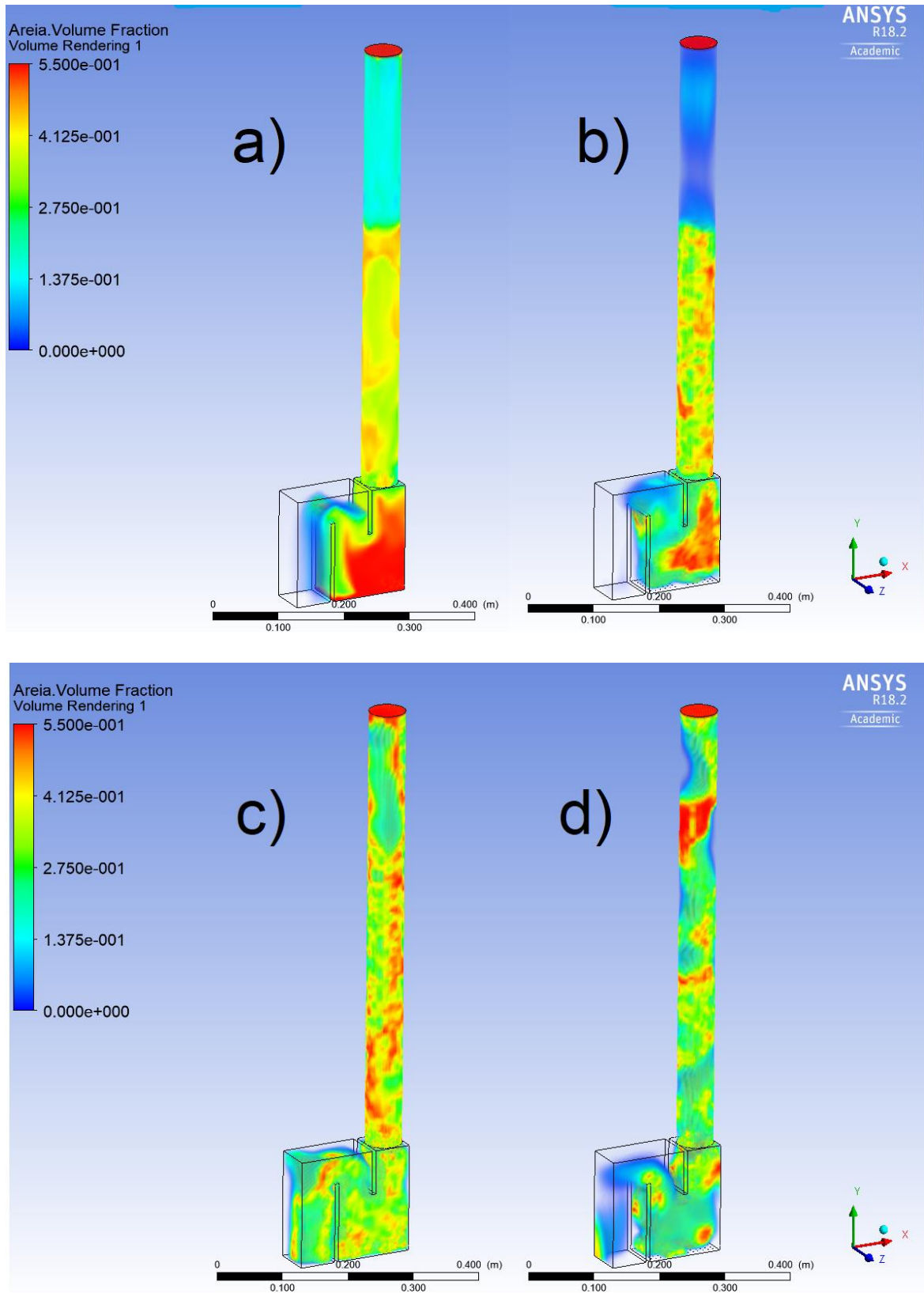
Com base na Figura 20 e 21, podem-se traçar alguns pontos de comparação entre os resultados experimental e simulado. É possível notar a formação de caminhos preferenciais na imagem real, mostrando uma região mais compactada, mais clara, onde há pouco deslocamento da areia, e uma região mais escura, passando de uma câmara para outra, onde há o maior fluxo de sólidos.

Esse fenômeno é muito bem representado pelo modelo *Symmetric*, porém, em contrastes de cor. Nesse caso, a região mais escura mostra um volume mais compactado de areia, com pouco fluxo, e a região mais clara, indica uma menor fração de sólidos, onde há a movimentação da areia.

Nota-se também a formação de caminhos preferenciais, no modelo *Symmetric*, observado durante os testes experimentais. Para os demais modelos, é possível argumentar que a interação proposta tornou a fase sólida mais diluída na fase primária, o ar. Nesses não foi possível observar tais caminhos preferenciais.

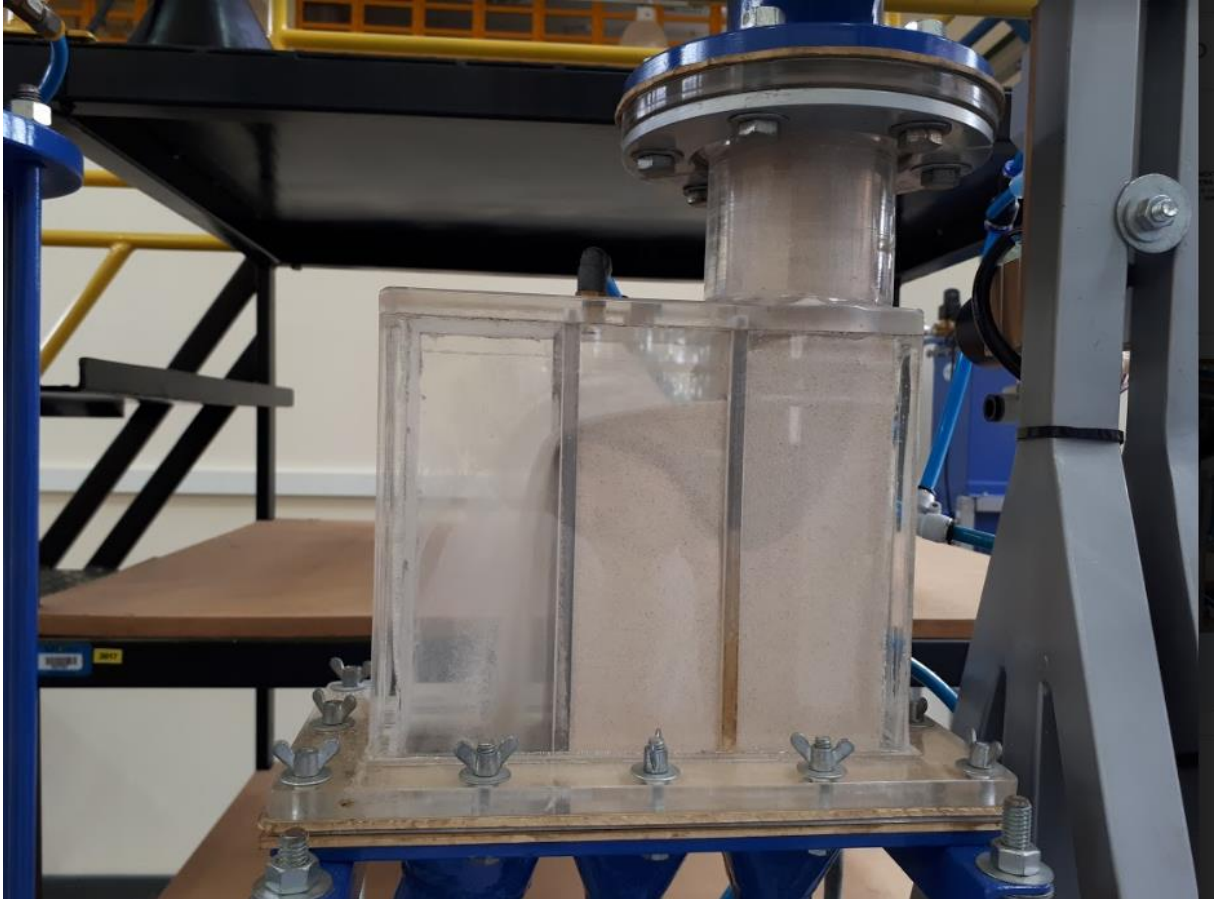
Desse modo, no quesito aproximação visual, o modelo *Symmetric* foi o que mais se aproximou dos resultados reais. Sendo assim, por ter sido o destaque em 2 dos 3 quesitos propostos, este foi o modelo escolhido.

Figura 20 – Comparativo das frações de volume de areia simulado. a) Modelo Symmetric; b) Modelo Wen e Yu; c) Modelo Syamlal; d) Modelo Gidaspow



Fonte: Autoria Própria

Figura 21 – Imagem do escoamento real

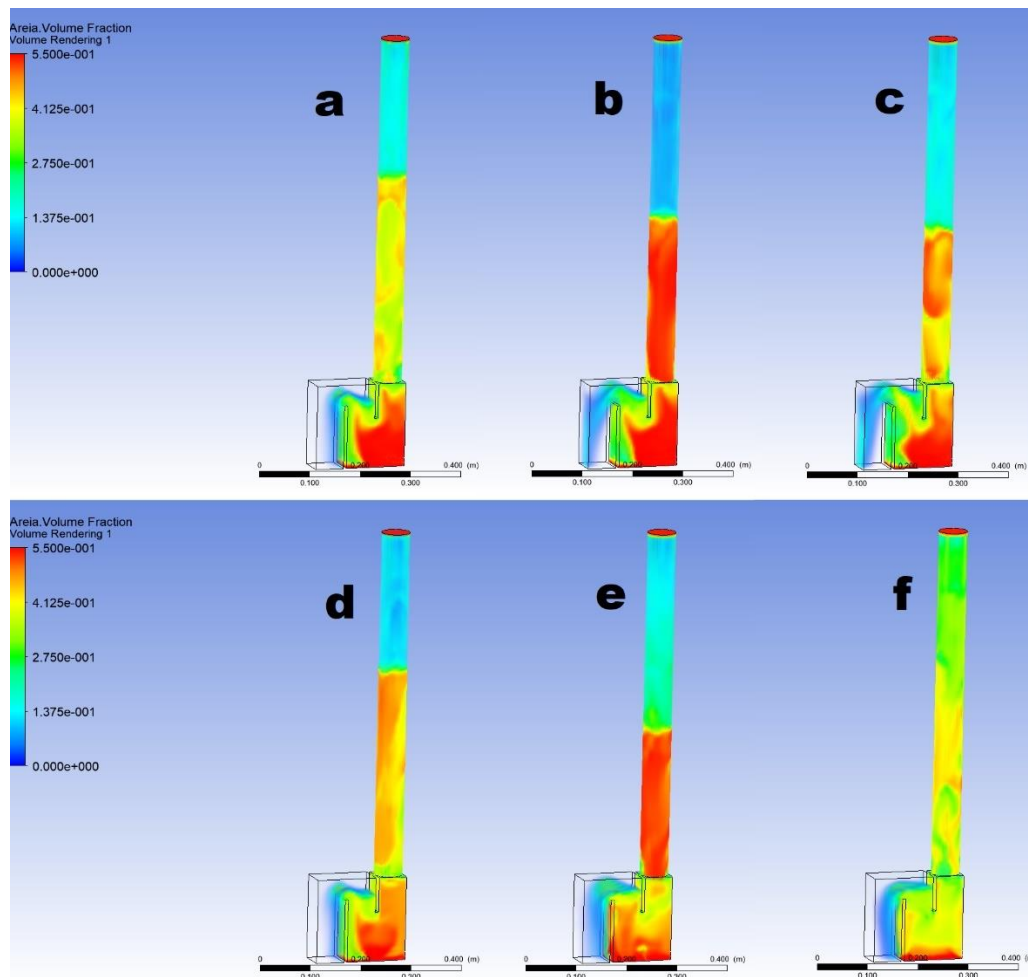


Fonte: Autoria Própria

4.2.5 – Resultados Finais

Tendo definido a geometria e a malha, as condições de contorno e o modelo de arraste mais apropriado, foi dada sequência à simulação proposta. A Figura 22 mostra o resultado do campo das frações volumétricas para areia nos seis experimentos propostos, com 20 s de operação.

Figura 22 – Frações volumétricas de areia para os 6 experimentos propostos. a) 20sL/min na C.R.; b) 28sL/min na C.R.; c) 36 sL/min na C.R.; d) 16 sL/min na C.R. e 4sL/min na C.A.; e) 16 sL/min na C.R. e 12sL/min na C.A.; f) 16 sL/min na C.R. e 20 sL/min na C.A.



Fonte: Autoria Própria

As imagens da Figura 22 mostram como o incremento da vazão total de ar na *loop-seal* promove o aumento na quantidade de sólidos que são reciclados. Isso pode ser notado pelo aumento na cachoeira formada na saída da *loop-seal*, como também pelo nível de areia no *standpipe*, cada vez menor. Na figura da letra “f”, nota-se que a reposição do reciclo por meio da UDF é o que sustenta o inventário de sólidos no *standpipe*.

Percebe-se, como esperado, a diminuição gradual da fração volumétrica da areia na *loop-seal*, devido ao aumento da quantidade de ar injetada na câmara. Assim, para uma mesma vazão total de aeração na câmara, é possível notar a uma melhor

distribuição das fases no corpo da *loop-seal* nos experimentos 4 a 6, representados pelas letras “d”, “e” e “f”

Outro ponto importante, trata-se dos caminhos preferenciais observados. Nas aerações monocâmaras, de “a” a “c”, a presença destes caminhos é mais notáveis do que nas aerações bicâmaras. A melhor distribuição de fases, discutida anteriormente, remove gradualmente esses caminhos preferenciais.

Quanto aos resultados numéricos, a Tabela 19 traz um resumo dos resultados gerais, que serão discutidos com base nos gráficos que se sucedem.

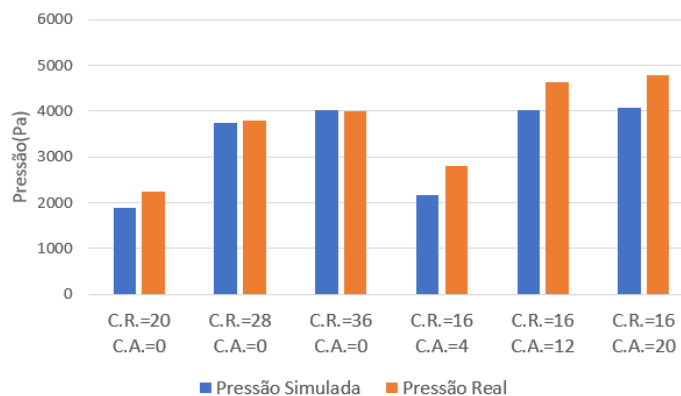
Tabela 19 – Resumo dos resultados simulados e experimentais.

Experimento	Pressão Simulada C.A. (Pa)	Pressão Real C.A. (Pa)	Pressão Simulada C.R. (Pa)	Pressão Real C.R. (Pa)	Gs (kg/m ² s)	Gs Real (kg/m ² s)
1	1885	2246	606	814	68	11
2	3749	3805	2420	2501	82	30
3	4017	4001	2726	2785	128	34
4	2179	2815	929	1085	62	13
5	4013	4645	2791	2804	121	34
6	4087	4791	3020	2921	138	37

Fonte: Autoria Própria

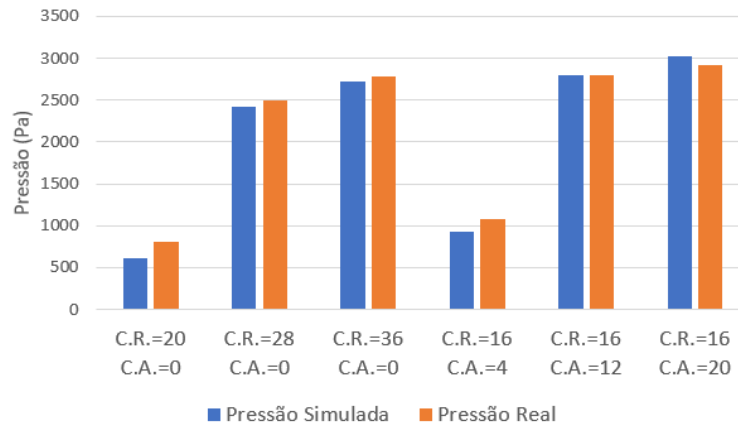
No Gráfico 10 e 11, apresentam-se os resultados das pressões simuladas em comparação com as pressões experimentais, nas câmaras de reciclagem e de alimentação.

Gráfico 10 – Comparativo entre as pressões simuladas e experimental na câmara de alimentação.



Fonte: Autoria Própria

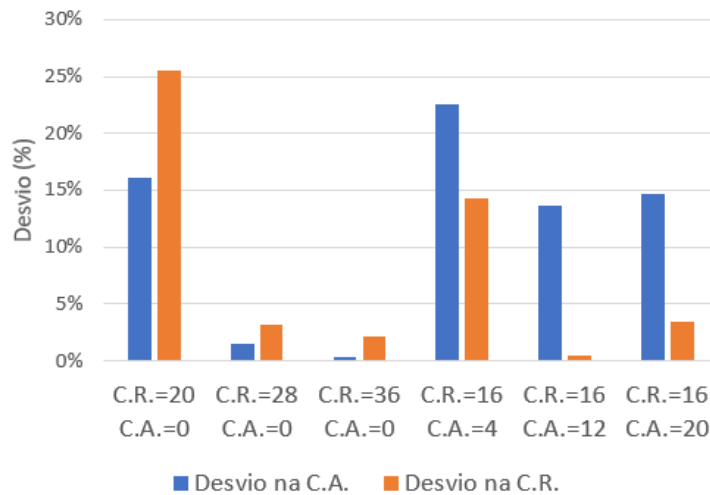
Gráfico 11 – Comparativo entre as pressões simuladas e experimental na câmara de reciclagem.



Fonte: Autoria Própria

Estes resultados sugerem valores de pressão simulados e experimentais próximos. O Gráfico 12 fornece os desvios correspondentes a essa comparação.

Gráfico 12 – Desvios entre os valores simulados e experimentais.

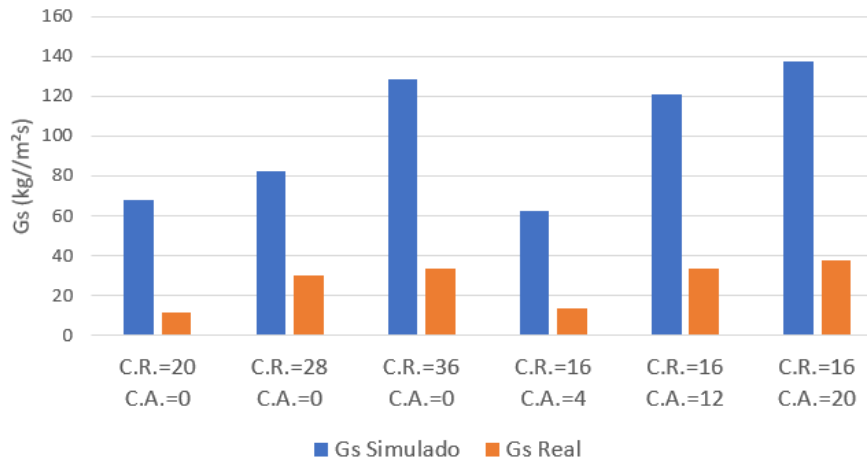


Fonte: Autoria Própria

Nota-se que no primeiro experimento para as aerações monocâmara e bicâmara se encontram as maiores discrepâncias entre resultados. No entanto, existe uma certa tendência de se aproximar ao valor real à medida que a aeração na *loop-seal* é aumentada.

Quanto à taxa de recirculação de sólidos, como foi analisado na seção 4.2.4, o modelo *Symmetric* não era o melhor para este quesito. Portanto, era de se esperar que houvessem valores incoerentes com o resultado experimental, conforme verificasse no Gráfico 13.

Gráfico 13 – Comparativo entre o G_s Simulado e o G_s Experimental.



Fonte: Autoria Própria

O Gráfico 13 mostra como os valores simulados para a taxa de recirculação de sólidos (G_s) diferem do observado experimentalmente. No entanto, existem alguns fatores que podem justificar essa discrepância. O primeiro deles trata-se da distribuição dos diâmetros das partículas. No caso real, o diâmetro proposto de 183 μ m é o resultado do peneiramento da areia, mas que não significa que todos os grãos de areia do inventário possuem o mesmo diâmetro. Logo, partículas menores podem estar entre grãos maiores, mudando o fluxo de sólidos. Um outro fator que justifica essa diferença nos resultados, é o modelo de arraste utilizado. Apesar de se aproximar nos demais quesitos, essa função de arraste possui limitações quanto a previsão do transporte de partículas sólidas pelo meio gasoso.

No entanto, apesar da diferença nos resultados, é possível notar que o mesmo segue a tendência prevista de que o aumento na aeração na *loop-seal* leva ao incremento do G_s , o que realmente se confirma.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho em questão, visou mostrar o uso de uma ferramenta computacional como meio de se poupar tempo, gastos e riscos desnecessários para obtenção de resultados, por meio de uma comparação entre os resultados reais e simulados.

Os resultados experimentais mostraram-se coerentes com a literatura, trazendo uma maior confiabilidade nos valores a serem usados de forma comparativa para com os resultados simulados. O balanço de pressão segue exatamente o que foi proposto durante a fundamentação teórica deste trabalho, e a relação entre incremento da aeração e recirculação de sólidos também se confirmou.

A simulação fluidodinâmica computacional realizada na válvula *loop-seal* apresentou resultados satisfatórios. A malha criada demonstrou características de qualidade excelentes, sem comprometer o tempo das simulações. O comportamento das frações volumétricas obtidas pela simulação numérica mostrou-se coerentes quando relacionado à intensidade da taxa da aeração, bem como ao modo (monocâmara ou bicâmara) da injeção de ar introduzida nas câmaras de reciclagem e de alimentação. Adicionalmente, os valores das pressões estáticas aferidas em locais específicos da válvula *loop-seal* mostraram-se muito próximas aos das simulações utilizando o modelo Symmetric.

A observação visual realizada durante os ensaios experimentais também corrobora o comportamento gás-sólido no domínio sob estudo. Por outro lado, os perfis da taxa de recirculação de sólidos simulados e medidos seguiram a mesma tendência em função da taxa de aeração, porém, com alguns desvios consideráveis em termos de valores comparativos para o modelo Symmetric e o obtido experimentalmente. As diferenças encontradas podem ter sido originadas pela não consideração da densidade populacional dos diâmetros das partículas e por outros fatores que teriam influência nas características do arraste dos sólidos, tais como, umidade, fator de forma, forças eletrostáticas, etc.

Assim, como sugestões de trabalhos futuros que podem ser realizados com base nos resultados apresentados mencionam-se: o estudo de outros modelos de arraste ou formas de adaptação dos atuais por meio de UDF's; o estudo da aplicação

de uma melhor distribuição da população dos diâmetros das partículas e também a proposição de um estudo utilizando-se a geometria completa de um leito fluidizado circulante.

6. REFERÊNCIAS

ANSYS MANUAL, **Approaches to Multiphase Modeling**. Disponível em: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node293.htm>. Acesso em: 26 maio 2018

ANSYS MANUAL, **Ansys Fluent UDF Manual**. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20UDF%20Manual.pdf>. Acesso em: 05 de janeiro de 2019

BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Ed. Taylor & Francis, Boca Raton-U.S.A, 473 p. 2006

BASU, P. **Circulating Fluidized Bed Boilers**. Ed. Springer, Halifax-U.S.A, 366 p., 2015

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

BASU, P; CHENG, L. **Effect of pressure on loop seal operation for a pressurized circulating fluidized bed**. *Powder Technology* 103, 1999, p.203–211

BENZARTI, S.; MHIRI, M.; BOURNOT, H.; **Drag models for Simulation Gas-Solid Flow in the Bubbling Fluidized Bed of FCC Particles**. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical and Molecular Engineering*. Vol:6, No:1, 2012, p.111-116

CROWE, C.; MICHAELIDES, E.; SCHWARZKOPF, J. **MULTIPHASE FLOW HANDBOOK**, 2^a ed., CRC Press ,Boca Raton, 2016, 1420 p.

ENGLISH, T. **A Look at the History of Computational Fluid Dynamics**. Disponível em: <http://shortsleeveandtieclub.com/a-look-at-the-history-of-computational-fluid-dynamics/> , 2017. Acesso em: 28 maio de 2018.

ELEKTRONIK MANUAL. **Basics of Flow Measurement Using Hot-film Anemometer**. Disponível em: http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/miscellaneous/principles_of_flow_measurement.pdf Acesso em 06 de maio de 2019

GIDASPOW, D. **MULTIPHASE FLOW AND FLUIDIZATION: CONTINUUM AND KINETIC THEORY DESCRIPTIONS**, United Kingdom Edition, Academic Press, San Diego, 474p., 1994

GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J.; **Hidrodinamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach.** *Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization.* p.75-82, 1992.

GUAN, Y.; CHANG, J.; ZHANG, K.; WANG, B.; SUN, Q.; **Three-dimensional CFD simulation of hydrodynamics in an interconnected fluidized bed for chemical looping combustion.** *Powder Technology* 268, 2014, p. 316-328

HOWARD, J. R. **Fluidized Bed Technology: Principle and applications.** Adam Higler, Nova Iorque, 1989, 214 p.

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

LI, C.; ZOU, Z.; LI, H.; ZHU, Q., **A hydrodynamic model of loop seal with a fluidized standpipe for a circulating fluidized bed.** *Particuology* 36, 2018, p.50–58

LUNA, C. M. R., **Estudo numérico de modelos de arrasto e do coeficiente de restituição no escoamento gás-sólido em leito fluidizado.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá UNESP, Guaratinguetá, 2013.

MARTINS, C.A., **Simulação do Perfil Axial de Pressão na Coluna Riser de um Leito Fluidizado Circulante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

NIKOLOPOULOS, A.; NIKOLOPOULOS, N.; CHARITOS, A.; GRAMMELIS, P.; KAKARAS, E.; BIDWE, A.R.; VARELA, G.; **High-resolution 3-D full-loop simulation of a CFB carbonator cold model.** *Chemical Engineering Science* 90, 2013, p. 137-150

OMEGA MANUAL, **Variable Area Flowmeters.** Disponível em: <https://www.me.psu.ac.th/~panya/303/Flow/VA.pdf>. Acesso em 05 de maio de 2019.

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

PEINING, W; JUNFU, L; WENCHONG, X; HAIRUI, Y; MAN, Z. **Impact of loop seal structure on gas solid flow in a CFB system.** Powder Technology 264, 2014, p.177–183

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.** 2015. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

SEO, M.W.; NGUYEN, T.D.B.; LIM, Y.I.; KIM, S.D.; PARK, S.; SONG, B.H.; KIM, Y.J.; **Solid circulation and *loop-seal* characteristics of a dual circulating fluidized bed: Experiments and CFD simulation.** Chemical Engineering Journal 168, 2011, p. 803-811

SYAMLAL, M.; O'BRIEN, T.J.; **Computer simulation of Bubbles in a fluidized Bed.** AIChE Symp. Series, vol 85 p. 22-31, 1989

TU, Q.; WANG, H., **CPFD study of a full-loop three-dimensional pilot-scale circulating fluidized bed based on EMMS drag model.** Powder Technology, 323, 2018, p. 534-547

WANG, Q.; YANG, H.; WANG, P.; LU, J.; Liu, Q.; ZHANG, H.; WEI, L.; ZHANG, M.; **Application of CPFD method in the simulation of a circulating fluidized bed with a loop seal Part I—Determination of solid parameters.** Powder Technology 253, 2014, p.814-821

WANG, Q.; YANG, H.; WANG, P.; LU, J.; Liu, Q.; ZHANG, H.; WEI, L.; ZHANG, M.; **Application of CPFD method in the simulation of a circulating fluidized bed with a loop seal Part II—Investigation of solids circulation.** Powder Technology 253, 2014, p.822-828

WEN, C.Y.; YU, Y.H.; **Mechanics of fluidization.** Chem. Eng. Prog. Symp. Series, vol 62, p. 100-111, 1966

ZHAO, M.; ZHANG, N.; LIU, X.; DU, W.; **Numerical simulation of loop seal for a circulating fluidized bed based on an improved EMMS bubbling model.** Powder Technology 284, 2015, p.443-451

XU, J.; LU, X.; ZHANG, W.; CHEN, J.; WANG, Q.; CHEN, Y.; GUO, Q., **Effects of superficial gas velocity and static bed height on gas-solid flow characteristics in a 60-meter-high transparent CFB riser.** Chemical Engineering Journal, 334, 2018, p. 545-557