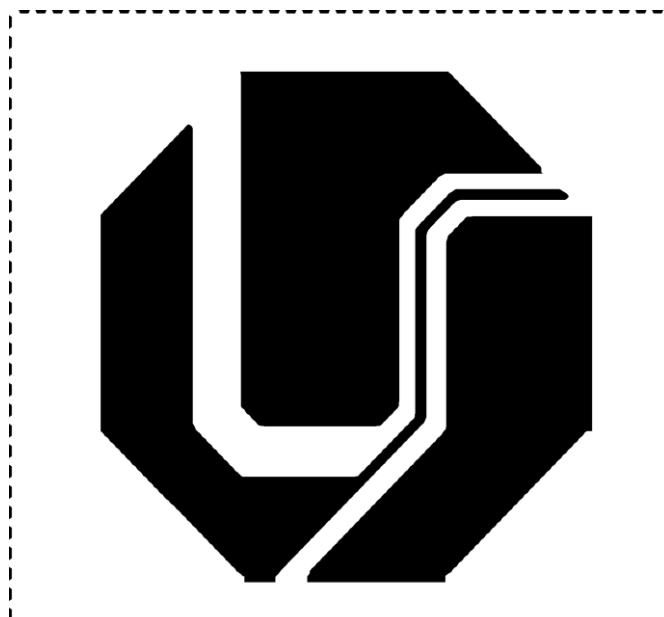


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ADEQUAÇÃO DA PRÁTICA DE LABORATÓRIO DE ENGENHARIA**  
**QUÍMICA DE LEITO FLUIDIZADO**

**Gabriela Mello Mosken**

Uberlândia – MG  
2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ADEQUAÇÃO DA PRÁTICA DE LABORATÓRIO DE ENGENHARIA  
QUÍMICA DE LEITO FLUIDIZADO**

Gabriela Mello Mosken

Monografia de graduação apresentada à  
Universidade Federal de Uberlândia como parte  
dos requisitos necessários para a aprovação na  
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do  
curso de Engenharia Química.

Uberlândia – MG  
2020

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA DE GABRIELA MELLO  
MOSKEN APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 05 DE  
OUTUBRO DE 2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Cláudio Roberto Duarte  
Orientador (FEQ/UFU)

---

Jeniffer Cristina Silveira  
Mestre em Engenharia Química (FEQ/UFU)

---

Rondinelli Moulin Lima  
Mestre em Engenharia Química (FEQ/UFU)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família por todo o amor, preocupação e compreensão durante esses anos de estudos, e principalmente aos meus pais Giselle e Odair por todo o esforço investido na minha educação.

Agradeço ao meu namorado Mikael que sempre esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico, e esteve presente nos momentos mais importantes. Diana, Canela, Maya, Guilherme e Gustavo também estão em meu coração e pensamentos.

Sou grata pela orientação, paciência e ensinamentos do meu professor Cláudio Roberto Duarte, orientador do meu trabalho.

E por último, mas não menos importante, também agradeço aos funcionários da Universidade, especialmente o Ulisses, que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão deste trabalho.

# SUMÁRIO

|                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                                                                                    | <b>I</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>                                                                                     | <b>II</b>  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>                                                                                   | <b>III</b> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                              | <b>V</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                            | <b>VI</b>  |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                       | <b>1</b>   |
| 1.1. OBJETIVO .....                                                                                              | 2          |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                                             | <b>2</b>   |
| 2.1. FUNDAMENTOS DE FLUIDIZAÇÃO .....                                                                            | 2          |
| 2.2. APLICAÇÕES DE LEITOS FLUIDIZADOS .....                                                                      | 4          |
| 2.3. REGIMES DE FLUIDIZAÇÃO.....                                                                                 | 5          |
| 2.3.1. LEITO FIXO.....                                                                                           | 7          |
| 2.3.2. FLUIDIZAÇÃO MÍNIMA OU INCIPIENTE.....                                                                     | 7          |
| 2.3.3. FLUIDIZAÇÃO DO SISTEMA LÍQUIDO-SÓLIDO PARTICULADA, SUAVE OU<br>HOMOGÊNEA.....                             | 8          |
| 2.3.4. FLUIDIZAÇÃO DO SISTEMA GÁS-SÓLIDO .....                                                                   | 8          |
| 2.3.4.1. FLUIDIZAÇÃO BORBULHANTE, AGREGATIVA OU HETEROGÊNEA .....                                                | 8          |
| 2.3.4.2. SLUGGING E LEITO PISTONADO .....                                                                        | 8          |
| 2.3.5. FLUIDIZAÇÃO COM TRANSPORTE PNEUMÁTICO .....                                                               | 9          |
| 2.4. MATERIAL PARTICULADO .....                                                                                  | 9          |
| 2.4.1. CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS (GRUPOS A, B, C e D) E GRÁFICO DE<br>GELDART.....                    | 9          |
| 2.4.2. DIÂMETRO MÉDIO DE SAUTER.....                                                                             | 11         |
| 2.5. CONCEITOS E EQUAÇÕES IMPORTANTES ACERCA DA FLUIDIZAÇÃO HOMOGÊNEA .....                                      | 11         |
| 2.5.1. MODELO MATEMÁTICO E FORÇA RESISTIVA DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO .....                                           | 12         |
| 2.5.2. QUEDA DE PRESSÃO EM CONDIÇÃO DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO .....                                                  | 13         |
| 2.5.3. FRAÇÃO DE VAZIOS DO LEITO EM CONDIÇÃO DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO .....                                         | 14         |
| 2.5.4. VELOCIDADE INTERSTICIAL OU SUPERFICIAL EM CONDIÇÃO DE MÍNIMA<br>FLUIDIZAÇÃO.....                          | 15         |
| 2.5.5. CURVA CARACTERÍSTICA DA FLUIDIZAÇÃO HOMOGÊNEA E DETERMINAÇÃO DA<br>VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO ..... | 17         |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                                               | <b>18</b>  |
| 3.1. UNIDADE EXPERIMENTAL .....                                                                                  | 18         |
| 3.2. MATERIAL PARTICULADO UTILIZADO.....                                                                         | 20         |
| 3.3. PROPRIEDADES DO FLUIDO E MATERIAL PARTICULADO.....                                                          | 21         |
| <b>4. RESULTADOS E TRATAMENTO DOS DADOS .....</b>                                                                | <b>21</b>  |
| 4.1. PRIMEIRA ADAPTAÇÃO .....                                                                                    | 21         |
| 4.2. SEGUNDA ADAPTAÇÃO.....                                                                                      | 22         |
| 4.3. TERCEIRA ADAPTAÇÃO.....                                                                                     | 22         |
| 4.4. QUARTA ADAPTAÇÃO.....                                                                                       | 24         |
| 4.5. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....                                                                                 | 26         |
| 4.6. CLASSIFICAÇÃO DE GELDART DO MATERIAL PARTICULADO.....                                                       | 27         |
| 4.7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....                                                                              | 28         |

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.8. DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DO LEITO FLUIDIZADO E EQUAÇÃO<br>CARACTERÍSTICA..... | 28        |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>                                                          | <b>31</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                          | <b>32</b> |
| <b>APÊNDICE A – ROTEIRO PROPOSTO PARA A PRÁTICA DE LEITO FLUIDIZADO.....</b>        | <b>34</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1 – ESQUEMA REPRESENTANDO DIFERENTES TIPOS DE FLUIDIZAÇÃO.....                                               | 6  |
| FIGURA 2.2 – GRÁFICO DE GELDART COM AS CLASSIFICAÇÕES DE GRUPOS DAS<br>PARTÍCULAS.....                                | 11 |
| FIGURA 2.3 – CURVA CARACTERÍSTICA DA FLUIDIZAÇÃO HOMOGÊNEA.....                                                       | 17 |
| FIGURA 3.1 – UNIDADE EXPERIMENTAL ORIGINAL.....                                                                       | 19 |
| FIGURA 3.2 – RESERVATÓRIO DE ÁGUA E BOMBA DA UNIDADE EXPERIMENTAL<br>ORIGINAL.....                                    | 19 |
| FIGURA 3.3 – PENEIRAS UTILIZADAS NO PENEIRAMENTO DAS ESFERAS DE VIDRO DA<br>UNIDADE.....                              | 20 |
| FIGURA 4.1 – LEITO FLUIDIZADO (DIREITA) DA PRIMEIRA ADAPTAÇÃO DA UNIDADE.....                                         | 21 |
| FIGURA 4.2 – CLASSIFICAÇÃO DE GELDART DO APARATO EXPERIMENTAL ORIGINAL, COM<br>DIÂMETRO MÉDIO DE 0,848 MM E ÁGUA..... | 22 |
| FIGURA 4.3 – LEITO FLUIDIZADO FINAL.....                                                                              | 23 |
| FIGURA 4.4 – ROTÂMETRO UTILIZADO DURANTE TERCEIRA ADAPTAÇÃO DA UNIDADE.....                                           | 23 |
| FIGURA 4.5 – TRANSMISSORES DE PRESSÃO DA MARCA PRESSGAGE.....                                                         | 24 |
| FIGURA 4.6 – MANÔMETRO DA MARCA FLUIR PNEUMÁTICA.....                                                                 | 24 |
| FIGURA 4.7 – PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA MARCA NATIONAL INSTRUMENTS.....                                           | 25 |
| FIGURA 4.8 – TELA DO <i>SOFTWARE</i> LABVIEW.....                                                                     | 25 |
| FIGURA 4.9 – LAYOUT FINAL DA UNIDADE EXPERIMENTAL DE LEITO FLUIDIZADO.....                                            | 26 |
| FIGURA 4.10 – CLASSIFICAÇÃO DE GELDART DO MATERIAL PARTICULADO DA<br>UNIDADE.....                                     | 27 |
| FIGURA 4.11 – CURVA CARACTERÍSTICA DA UNIDADE EXPERIMENTAL DE LEITO<br>FLUIDIZADO.....                                | 30 |
| FIGURA 4.12 – CURVA CARACTERÍSTICA DA FLUIDIZAÇÃO DA LITERATURA.....                                                  | 31 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 2.1 – VALORES PARA AS CONSTANTES $K_1$ E $K_2$ .....               | 16 |
| TABELA 3.1 – PROPRIEDADES DO FLUIDO E MATERIAL<br>PARTICULADO.....        | 21 |
| TABELA 4.1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL PARTICULADO.....          | 26 |
| TABELA 4.2 – DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DO LEITO FLUIDIZADO UTILIZADO..... | 28 |
| TABELA 4.3 – DADOS COLETADOS DO EXPERIMENTO.....                          | 29 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |                                                                                  |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $Ar$           | Número de Arquimedes, $[M^0L^0T^0]$                                              |
| $\acute{A}rea$ | Área de seção transversal do leito, $[M^0L^2T^0]$                                |
| $c$            | Constante da força resistiva de mínima fluidização, $[M^0L^0T^0]$                |
| $D$            | Diâmetro da coluna, $[M^0L^1T^0]$                                                |
| $\bar{D}$      | Diâmetro médio de Sauter, $[M^0L^1T^0]$                                          |
| $D_i$          | Diâmetro médio de cada faixa de partículas, $[M^0L^1T^0]$                        |
| $d$            | Diâmetro médio das partículas, $[M^0L^1T^0]$                                     |
| $\mathbf{g}$   | Aceleração gravitacional vetorial, $[M^0L^1T^{-2}]$                              |
| $H_{mf}$       | Altura do leito expandido, $[M^0L^1T^0]$                                         |
| $k$            | Constante de permeabilidade, $[M^0L^0T^0]$                                       |
| $K_1$          | Constante de adimensionalização, $[M^0L^0T^0]$                                   |
| $K_2$          | Constante de adimensionalização, $[M^0L^0T^0]$                                   |
| $L_m$          | Altura das partículas depositadas no fundo da coluna, $[M^0L^1T^0]$              |
| $\mathbf{m}$   | Força resistiva vetorial, $[M^1L^{-2}T^{-2}]$                                    |
| $m_{mf}$       | Força resistiva em condição de mínima fluidização, $[M^1L^{-2}T^{-2}]$           |
| $m_p$          | Massa de partículas contidas no leito, $[M^1L^0T^0]$                             |
| $p_f$          | Pressão exercida na fase fluida, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$                             |
| $p_s$          | Pressão exercida na fase particulada, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$                        |
| $P$            | Pressão piezométrica, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$                                        |
| $q_{mf}$       | Velocidade superficial em condição de mínima fluidização, $[M^0L^1T^{-1}]$       |
| $Re$           | Número de Reynolds, $[M^0L^0T^0]$                                                |
| $Re_{pmf}$     | Número de Reynolds da partícula em condição de mínima fluidização, $[M^0L^0T^0]$ |
| $\mathbf{u}_f$ | Vetor velocidade da fase fluida, $[M^0L^1T^{-1}]$                                |
| $\mathbf{u}_s$ | Vetor velocidade da fase particulada, $[M^0L^1T^{-1}]$                           |
| $\nu_f$        | Viscosidade cinemática da fase fluida, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$                       |

### Símbolos Gregos

|                  |                                                                           |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $-\Delta P_{mf}$ | Queda de pressão em condição de mínima fluidização, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$   |
| $\Delta x$       | Fração de massa das partículas com diâmetro menor que $D$ , $[M^0L^0T^0]$ |
| $\beta$          | Fator de forma, $[M^0L^0T^0]$                                             |
| $\varepsilon$    | Fração de vazios, $[M^0L^0T^0]$                                           |

|                    |                                                                       |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon_{lf}$ | Fração de vazios em condição de leito fixo, $[M^0L^0T^0]$             |
| $\varepsilon_{mf}$ | Fração de vazios em condição de mínima fluidização, $[M^0L^0T^0]$     |
| $\varepsilon_s$    | Fração volumétrica da fase particulada, $[M^0L^0T^0]$                 |
| $\tau_f$           | Tensor tensão extra exercido na fase fluida, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$      |
| $\tau_s$           | Tensor tensão extra exercido na fase particulada, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$ |
| $\mu_f$            | Viscosidade do fluido, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$                            |
| $\mu_s$            | Viscosidade da partícula, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$                         |
| $\phi$             | Esfericidade da partícula, $[M^0L^0T^0]$                              |
| $\rho_f$           | Densidade do fluido, $[M^1L^{-3}T^0]$                                 |
| $\rho_s$           | Densidade da partícula, $[M^1L^{-3}T^0]$                              |
| $\Omega$           | Constante da Equação de Ergun, $[M^0L^0T^0]$                          |

## RESUMO

A fluidização pode ser compreendida como a circulação de sólidos juntamente com um fluido, o qual proporciona sua principal propriedade: intensa mistura entre as fases. O entendimento dessa operação unitária é crucial para a formação de engenheiros químicos, por estar cada vez mais presente no mundo industrial e para isso, o estudo de sua teoria e prática fazem parte do currículo obrigatório da engenharia química. A implementação da prática de laboratório nas universidades confere ao estudante uma importante visão do processo, e que por sua vez, faz parte dos encargos do engenheiro. A unidade experimental de leito fluidizado do Laboratório de Engenharia Química 1 apresentava problemas recorrentes como: a abrasão resultante da interação dos materiais sólidos com o leito e o arraste de partículas, que acontecia quando a velocidade era superior à velocidade mínima de fluidização. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi identificar as limitações do aparato experimental, recuperar a prática e configurar um modelo de roteiro ajustável. Inicialmente, foi necessária uma revisão sobre a teoria de fluidização, análise granulométrica, diâmetro de Sauter e classificação de Geldart para a escolha do material particulado e as dimensões características que o leito deveria apresentar. A seguir, foram realizadas quatro adaptações no leito e testes, até que o seu *layout* final fosse definido. O leito foi totalmente reconstruído, com a substituição do material particulado e fluido de trabalho possibilitando a completa recuperação da prática de laboratório. Verificou-se que o leito se encaixa perfeitamente na teoria de fluidização e um novo modelo de roteiro para a aula prática foi proposto.

**Palavras-chave:** fluidização; leito fluidizado; unidade experimental; laboratório; roteiro.

## ***ABSTRACT***

Fluidization can be understood as the circulation of solids together with a fluid, which provides its main property: intense mixing between the phases. Understanding this unitary operation is crucial for the training of chemical engineers, as it is increasingly present in the industrial world and for that, the study of its theory and practice are part of the mandatory curriculum of chemical engineering. The implementation of laboratory practice at universities gives the student an important view of the process, which in turn is part of the engineer's responsibilities. The experimental fluidized bed unit of the Chemical Engineering Laboratory 1 presented recurrent problems such as: the abrasion resulting from the interaction of solid materials with the bed and the dragging of particles, which happened when the speed was higher than the minimum fluidization speed. Therefore, the objective of this work was to identify the limitations of the experimental apparatus, recover the practice and configure an adjustable script model. Initially, it was necessary to review the fluidization theory, granulometric analysis, Sauter diameter and Geldart classification for the choice of particulate material and the characteristic dimensions that the bed should present. Next, four adaptations were made to the bed and tests, until its final layout was defined. The bed was completely rebuilt, with the replacement of particulate material and working fluid allowing the complete recovery of laboratory practice. It was found that the bed fits perfectly into the fluidization theory and a new script model for the practical class was proposed.

**Keywords:** fluidization; fluidized bed; experimental unity; laboratory; script.

# 1. INTRODUÇÃO

O Engenheiro é um profissional cada vez mais presente no mundo moderno. Grande parte do que se constrói, fabrica e otimiza, faz parte dos encargos desse profissional. Não há como discordar que a sociedade está cada vez mais interligada, e a cada dia, a importância desse profissional que busca manter qualidade, processos, equipamentos e resultados alinhados, está crescendo.

Para ser capaz de aplicar a ciência e a tecnologia, o engenheiro em formação consegue acessar e adaptar seus conhecimentos nas aulas práticas da universidade. Os laboratórios são de tamanha importância por conferir ao engenheiro sua principal característica: confrontar a teoria e a prática. O engenheiro necessita visualizar um problema real (que apresenta determinadas condições) e saber a teoria por trás (quais as condições ideais). A recíproca também se aplica. Entender o fundamento e visualizar a prática daquele conceito também faz parte da rotina desse profissional. Na engenharia a prática e a teoria devem caminhar juntas, e para isso, o curso de Engenharia Química disponibiliza diversos equipamentos essenciais ao conhecimento do engenheiro; um deles é o leito fluidizado.

A fluidização é o fenômeno de suspensão de partículas. Um fluido (água ou ar) passa por entre as partículas, sem arrastá-las, e confere a elas, a partir de um certo fluxo, a propriedade de se tornar parte do fluido. Os leitos fluidizados integram processos de produção em inúmeras áreas da engenharia química. Na indústria petroquímica são empregados no cracking catalítico para produção de gasolina, cracking térmico para produzir etileno e propileno, além de servir ainda para a polimerização deste último. Na indústria alimentícia os leitos fluidizados participam dos sistemas de torrefação de café, congelamento e secagem de alimentos e ainda no recobrimento de doces e pastilhas e sistemas de microencapsulação. Por ser uma operação unitária bastante vantajosa, e alvo de inúmeros estudos e publicações sobre suas propriedades, é importante que seja representada nas universidades em aparatos experimentais.

Desde 2013, a unidade experimental de leito fluidizado do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia encontrava-se indisponível para utilização em aulas práticas. Ao longo dos anos, e com grande contato com os estudantes, parte da estrutura desse aparato sofreu alterações quanto aos resultados, estando desregulada, não operando de acordo com as características específicas da prática, e apresentando problemas como a enorme abrasão

resultante da interação do material sólido com o leito. Outro problema era o arraste das partículas, que acontecia quando a velocidade era superior à velocidade mínima de fluidização.

## **1.1 Objetivo**

Diante do que foi exposto, essa monografia tem como objetivos reconstruir a unidade experimental de Leito Fluidizado, propondo um maior contato dos alunos com o estudo da separação através de análises granulométricas e determinação de diâmetro médio; propor um roteiro compatível; e torná-la executável para a disciplina Laboratório de Engenharia Química 1.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A Revisão Bibliográfica que se segue faz parte do entendimento do atual estudo, revisando conceitos relacionados à fluidização, e mais especificamente, relatando sobre a fluidização gás-sólido, suas vantagens e desvantagens, origem, aplicações e como se comporta (tipos de regimes fluidodinâmicos e modelo matemático).

### **2.1. Fundamentos de Fluidização**

Fluidização é a operação unitária na qual uma suspensão de partículas pode ser observada quando ocorre a passagem de um fluido, gás ou líquido, sem o arraste das partículas (PRIETO, 2014), e que confere a característica que, a partir de um certo fluxo crítico, o sólido passa a se comportar como um fluido (SCATENA, 2018).

Os processos em leito fluidizado são de tamanha importância para a operação industrial por apresentarem diversos benefícios, são eles:

- Altas taxas de transferência de calor e massa, pois há um íntimo contato entre as fases;
- Dependendo dos parâmetros operacionais, podem operar com uma ampla faixa de diâmetro de partículas;

- A capacidade de mistura intensa entre as fases leva a um comportamento próximo ao isotérmico, facilitando a operação e evitando a mudança brusca de temperaturas, que consequentemente auxilia no controle de reações químicas exotérmicas;
- Equipamentos mais compactos, com áreas superficiais de trocas de calor pequenas (DA SILVA, 2000);
- Operação automática contínua facilmente controlada, uma vez que o escoamento das partículas permite operações nesse regime;
- Podem ser utilizados em larga escala (FERNANDO, 2018);
- Principalmente para secadores, possui eficiência térmica elevada;
- Baixo custo de manutenção e operações confiáveis;
- Ausência de peças móveis;
- Facilidade de retirar os sólidos do reator pela alta fluidez do leito (RIBAS, 2006).

Todavia, a fluidização não é adequada em algumas situações, e entre as suas desvantagens estão:

- A mudança das características fluidodinâmicas do leito devido a quebras do sólido ao longo do tempo e a perda de produto de valor agregado pela alta agitação;
- Com alta abrasão entre as partículas sólidas, a erosão dos componentes pode acontecer;
- Especialmente para reações com altas conversões, o tempo de residência não é uniforme devido à mistura intensa das partículas (FERNANDO, 2018);
- Alto consumo de energia (VALDO, 2008);
- Em situações com altas vazões e leitos borbulhantes, existe uma dificuldade em descrever o fluxo do gás. Reagentes não reagidos podem aparecer no produto e podem ocorrer reações secundárias indesejáveis (RIBAS, 2006);
- Aglomeração ou sinterização do sólido pode demandar menores temperaturas, reduzindo a taxa de reação drasticamente (VIEGAS, 1999);
- Necessidade de reposição do sólido pela pulverização na mistura (GEBARA, 2006).

## 2.2. Aplicações de Leitos Fluidizados

Durante a Segunda Revolução Industrial - iniciada na segunda metade do século XIX – novas técnicas, máquinas e modos de produção surgiram; e entre essas tecnologias, o primeiro esboço de um gaseificador de carvão mineral, utilizando leito fluidizado, foi apresentado. A partir dessa descoberta, os estudos na área da fluidização se tornaram mais comuns.

Durante a Segunda Guerra Mundial – em 1939 – surgiu a necessidade de uma produção mais rápida de gasolina para aviação. Reunindo diversos esforços e otimizando a tecnologia, a empresa *Standard Oil* desenvolveu a primeira planta industrial de craqueamento catalítico do petróleo operando em um regime de fluidização rápida (FERNANDO, 2018).

De Sant’Anna (2015), destaca que:

Dentre as aplicações industriais que utilizam reatores de leito fluidizado, a mais conhecida é a combustão de carvão, biomassa ou resíduos para a geração de energia. Entre outras aplicações incluem-se: a dessulfurização de gases, a calcinação, a produção de cimento e o craqueamento catalítico de petróleo.

A fluidização também é utilizada na indústria alimentícia e metalúrgica nos sistemas de torrefação de café, mistura, aquecimento e resfriamento de sólidos, congelamento, pelletização (aglutinação das partículas de um minério para facilitar as operações posteriores), processos de adsorção e na produção de borracha. (DE VASCONCELOS, 2011; DECHSIRI, 2004; KUNII e LEVENSPIEL, 1923). Além disso, muitas aplicações focam na captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxidação fotolítica por UV, produção de silício de pureza elevada para ser utilizado na indústria de energia solar (FERNANDO, 2018) e em tratamentos de águas residuárias (cervejarias, esgoto sanitário, indústria de papel e celulose, etc.) (GEBARA, 2006).

Castilho (2011) afirma que devido à versatilidade de aplicação, suas propriedades são objeto de intensa investigação. Para Kunii e Levenspiel (1923), existe um destaque especial para a secagem e o recobrimento de sólidos utilizando os leitos fluidizados. A secagem por fluidização, principalmente para a área agrícola, tem sido desenvolvida para promover condições favoráveis às sementes (melhor armazenamento ou para a germinação imediata) (COSTA, 2010). Esta operação pode ser estendida para usos em fármacos, fertilizantes, inorgânicos (sal), areia, minérios triturados, polímeros, produtos cristalinos, e utilizando a fluidização com ar quente, pode-se secar também muitos pós úmidos e grãos (FERNANDO,

2018). A utilização do recobrimento por leito fluidizado tem finalidade de proteger o produto contra micro-organismos, umidade, calor e luminosidade; e permitir maior resistência mecânica das partículas, e incluem partículas como comprimidos e drágeas de açúcar na indústria farmacêutica, alimentos, catalisadores químicos, pós coesivos e metais (SILVA, 2015).

### **2.3. Regimes de Fluidização**

As movimentações produzidas pelos leitos fluidizados e suas características definem o que se chama de regimes fluidodinâmicos. Estes estão altamente relacionados às propriedades físicas das partículas: distribuição granulométrica, tamanho médio, forma e massa específica; às propriedades do fluido: viscosidade dinâmica e massa específica; e às próprias condições operacionais da coluna: temperatura e vazão do fluido, altura efetiva, diâmetro e compactação do sólido (SCATENA, 2018; CREMASCO, 2012).

Para entender os regimes, imagina-se uma massa de partículas acomodada sobre uma placa ou tela perfurada, formando um leito de seção transversal circular ou retangular. Uma corrente gasosa/ líquida começa a atravessar esse leito de partículas no sentido ascendente. O fluido, a uma baixa velocidade, escoar nos espaços entre as partículas, sem promover movimentação do material, e o leito mantém-se fixo. À medida que se aumenta a velocidade do fluido, as partículas afastam-se e algumas começam a apresentar uma leve vibração, levando à expansão do leito. Com velocidade ainda maior, atinge-se uma condição em que a soma das forças causadas pelo escoamento do gás no sentido ascendente igualam-se ao peso das partículas, que ficam suspensas e sem sofrerem arraste. Nessa situação, em que o movimento do material é mais vigoroso, atinge-se o leito fluidizado. À velocidade do gás nessa condição dá-se o nome de velocidade de mínima fluidização, que é a velocidade correspondente ao regime de fluidização incipiente (NITZ e GUARDANI, 2008). Fernando (2018) cita que:

A partir da velocidade mínima a força de arraste supera a gravitacional e o sólido particulado adquire as propriedades de um fluido. Este fato pode ser constatado por propriedades simples de um fluido, como a capacidade de flutuação de um objeto de massa específica menor, variação proporcional da pressão com a altura e capacidade de escoamento.

A Figura (2.1) representa um esquema dos diferentes tipos de fluidização (que serão discutidos a seguir) correlacionando os fluidos líquido e gasoso.

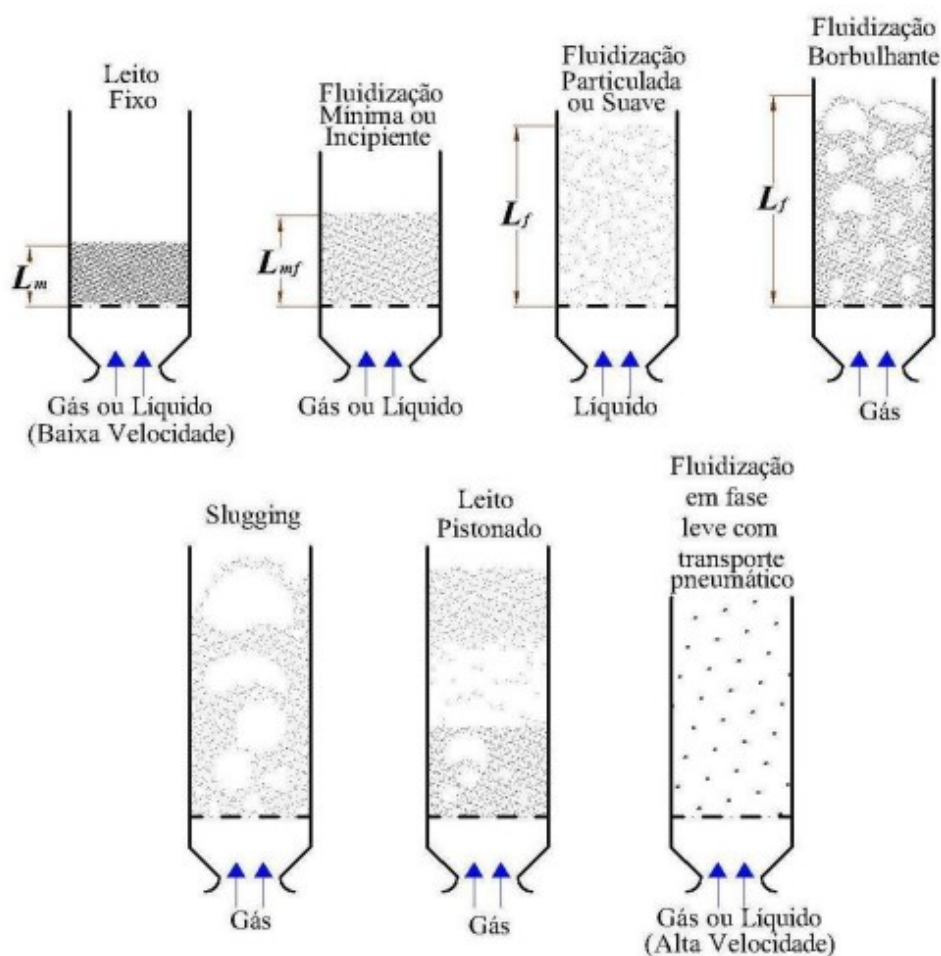


Figura 2.1 – Esquema representando diferentes tipos de fluidização. Fonte: VISSOTTO, 2013.

Quando temos um sistema líquido-sólido e a velocidade é maior que a velocidade de mínima fluidização, a fluidodinâmica do sistema, é dita homogênea. Essa fluidização é caracterizada por ausência de grandes instabilidades, ocorrendo uma leve expansão da massa particulada, sem surgimento de bolhas e não uniformidades no leito. Não obstante, o sistema gás-sólido é muito mais complexo quando a velocidade supera a velocidade de mínima fluidização. Sua fluidodinâmica se torna heterogênea, e muitas instabilidades, bolhas e caminhos preferenciais surgem ao longo do leito, deixando o escoamento das partículas mais caótico, com agitação mais intensa, sem grandes expansões. A exceção a essa regra acontece quando utiliza-se de partículas de alta densidade em gases com baixa densidade, uma vez que

causa pequena expansão nos limiares da mínima fluidização. Por essas razões, o sistema gás-sólido requer maior estudo e aprofundamento, uma vez que esse fenômeno influencia diretamente nas taxas de transferência de massa, energia e momentum no interior do equipamento (SCATENA, 2018; DE SANT'ANNA, 2015; COSTA, 2010; PRIETO, 2014; DE OLIVEIRA, 2015).

### **2.3.1. Leito Fixo**

Inicialmente, quando não há passagem de nenhum fluido, existe uma camada de sólido depositada no fundo do leito de altura  $L_m$ , que apresenta espaços vazios, ou interstícios, entre suas partículas. Denomina-se estado de leito fixo, a passagem de um fluido, sendo ele líquido ou gasoso, com uma velocidade superficial tão baixa, que não altera a camada de sólido, uma vez que o fluido escoar entre a porosidade do leito granular. Nesse estado não há distinção entre a fluidização em um sistema com fluidos líquidos ou gasosos, e a queda de pressão – que representa o equilíbrio das forças peso, empuxo e as forças resistivas sobre as partículas sólidas - é aproximadamente proporcional à velocidade do fluido (VALDO, 2008; PARISE, 2007).

### **2.3.2. Fluidização Mínima ou Incipiente**

Com o aumento da velocidade superficial do fluido, mesmo que abaixo da mínima fluidização, as partículas apresentam movimentos vibracionais e o leito, como um todo, sofre uma expansão. A este estado denomina-se leito expandido. Com mais um incremento da velocidade, todas as partículas ficam em suspensão, atingindo, nesse ponto, a velocidade de fluidização mínima do sólido (DE SANT'ANNA, 2015; PRIETO, 2014).

A fluidização incipiente ou mínima fluidização, apresenta características interessantes. As forças de arraste do fluido sobre o sólido e o peso do sólido entram em equilíbrio. A queda de pressão através de qualquer seção no leito torna-se igual ao peso das partículas naquela seção (DA SILVA, 2000).

A partir do ponto de mínima fluidização, os sistemas líquido-sólido e gás-sólido comportam-se de modo diferente.

### **2.3.3. Fluidização do Sistema Líquido-Sólido Particulada, Suave ou Homogênea**

O sistema líquido-sólido apresenta uma fluidização conhecida por ser suave ou homogênea, uma vez que o aumento da velocidade ocasiona uma suave e progressiva expansão do leito. Essa expansão, até a altura máxima da coluna, acontece sem presença de bolhas ou não uniformidades do leito. O próximo estágio desse sistema é o arraste das partículas (SANT'ANNA, 2015).

### **2.3.4. Fluidização do Sistema Gás-Sólido**

A fluidização gás-sólido pode apresentar as etapas borbulhante, slugging, leito pistonado, e transporte pneumático. Suas características são descritas a seguir.

#### **2.3.4.1. Fluidização Borbulhante, Agregativa ou Heterogênea**

Na fluidização borbulhante, o sistema gás-sólido proporciona grandes instabilidades, bolhas e redução na concentração volumétrica dos sólidos com o aumento da velocidade. Essas instabilidades, e a formação de caminhos preferenciais são observados no leito, que se expande muito acima do volume de mínima fluidização. Quando a velocidade mínima de fluidização é ultrapassada e a velocidade mínima de borbulhamento é atingida – a qual depende das propriedades das partículas e da viscosidade do gás, a queda de pressão no leito mantém-se praticamente constante, independente do aumento da velocidade superficial do gás (PRIETO, 2014; DA SILVA, 2000).

#### **2.3.4.2. Slugging e Leito Pistonado**

O regime de fluidização do tipo slugging é marcado pela alta velocidade no leito, e pela aparência de bolhas grandes, que ao se romperem pelo choque com a superfície da coluna liberam grande energia, tornando o movimento muito mais turbulento e oscilatório. As bolhas crescem e coalescem, movendo-se para cima e arrastando o sólido consigo. Para leitos altos e de diâmetro pequeno, as bolhas podem atingir um tamanho equivalente ao diâmetro da coluna. É um regime muito dependente da geometria do leito e bastante indesejável, uma vez que reduz

o desempenho de operações físicas e químicas no reator e produz queda de pressão ao longo da coluna (SANT'ANNA, 2015).

Quando a velocidade sofre ainda mais incrementos, o tamanho das bolhas pode atingir todo o diâmetro da coluna, ocasionando espaços vazios de fluido e caracterizando o regime de empistonamento (VALDO, 2008).

### **2.3.5. Fluidização com Transporte Pneumático**

Finalmente, em uma velocidade suficientemente alta do gás, superior ou igual à velocidade terminal das partículas, o leito atinge o último regime, conhecido como leito fluidizado disperso, ou fluidização com transporte pneumático. Nesse regime, a fase densa na base do leito desaparece, ocorre um aumento significativo da porosidade e as partículas são arrastadas para fora da coluna pelo gás (PAULO, 2017).

É importante ressaltar que um leito fluidizado não irá passar, necessariamente, por todos os regimes em um mesmo equipamento, pois estes dependem de outros fatores além da velocidade do gás, como características da partícula, diâmetro do leito e quantidade de material particulado.

## **2.4. Material Particulado**

O material particulado apresenta uma grande influência sobre o tipo de fluidização a ser desenvolvida. A classificação de Geldart, a análise granulométrica e a obtenção do diâmetro médio ajudam a modelar a fluidização para o mais homogênea possível.

### **2.4.1. Classificação das Partículas Sólidas (Grupos A, B, C e D) e Gráfico de Geldart**

Como citado anteriormente, o processo de fluidização possui inúmeras vantagens e aplicações industriais. Diante de inúmeras pesquisas desenvolvidas e da grande variedade de materiais particulados, viu-se a necessidade de classificá-los de acordo com suas propriedades físicas (COSTA, 2010). Geldart em 1973, classificou os sólidos em quatro grupos, de A a D,

identificáveis por seu tamanho e densidade, e que apresentam comportamentos diferentes quando fluidizados (PAULO, 2017).

Grupo A (Aeráveis) – Caracteriza-se de modo geral por materiais de diâmetro na faixa de 20 a 100  $\mu\text{m}$  e massa específica até 1400  $\text{kg.m}^{-3}$ . Apresentam expansão considerável e homogênea no leito após a condição de mínima fluidização até o início da fluidização borbulhante, normalmente com formação de pequenas bolhas. Estas são mais rápidas que o restante do gás, se rompem ou se juntam continuamente. Um exemplo de material desse grupo é o FCC (Fluidized Catalytic Cracking), muito utilizado no processo de craqueamento catalítico do petróleo (SCATENA, 2018; SANT'ANNA, 2015);

Grupo B (Areia) - Abrange partículas de 40 a 500  $\mu\text{m}$  e massa específica de 1400 a 4000  $\text{kg.m}^{-3}$ . Tendem a gerar bolhas já na mínima fluidização, fazendo com que o borbulhamento seja vigoroso, aumentando com a altura da coluna e velocidade do fluido; e a expansão e mistura do leito sejam moderadas. Quando o suprimento de ar é interrompido, o leito colapsa rapidamente. É neste grupo que se encontram grande parte dos sólidos utilizados em leitos fluidizados industriais (carvão, madeira, sementes, etc.) e a areia (VALDO, 2008);

Grupo C (Coesivas) – As partículas dessa classificação apresentam diâmetro inferior a 30  $\mu\text{m}$  e baixa massa específica. São sólidos finos, altamente coesivos e de difícil fluidização. Após a mínima fluidização, surgem caminhos preferenciais em que o leito apresenta altas taxas de expansão e uma migração rápida para a fluidização pistonada, sendo necessário o uso de agitadores mecânicos ou mesmo de vibração para melhorar a fluidização. Os sólidos do grupo C são particularmente interessantes para a área industrial, pois são usados como catalisadores, na indústria cerâmica ou como pós-magnéticos. Outros exemplos conhecidos deste tipo de partícula são a farinha de trigo, amido, pós-faciais e o cimento (PRIETO, 2014).

Grupo D (Jorro) - É composto pelas maiores partículas, acima de 1000  $\mu\text{m}$ , e com altas densidades (maiores que 4000  $\text{kg.m}^{-3}$ ), apresentando baixas expansões e surgimento de caminhos preferenciais, sendo mais indicado a utilização de um leito de jorro para seu tratamento. Os grãos de soja, feijões, café, ervilha, arroz e fármacos são exemplos dessas partículas (FERNANDO, 2018).

A Figura (2.2) representa o gráfico de Geldart, em que é possível, através da massa específica do fluido ( $\rho_f$ ), da massa específica da partícula ( $\rho_s$ ) e do diâmetro médio das partículas ( $d$ ), obter a classificação do sólido.

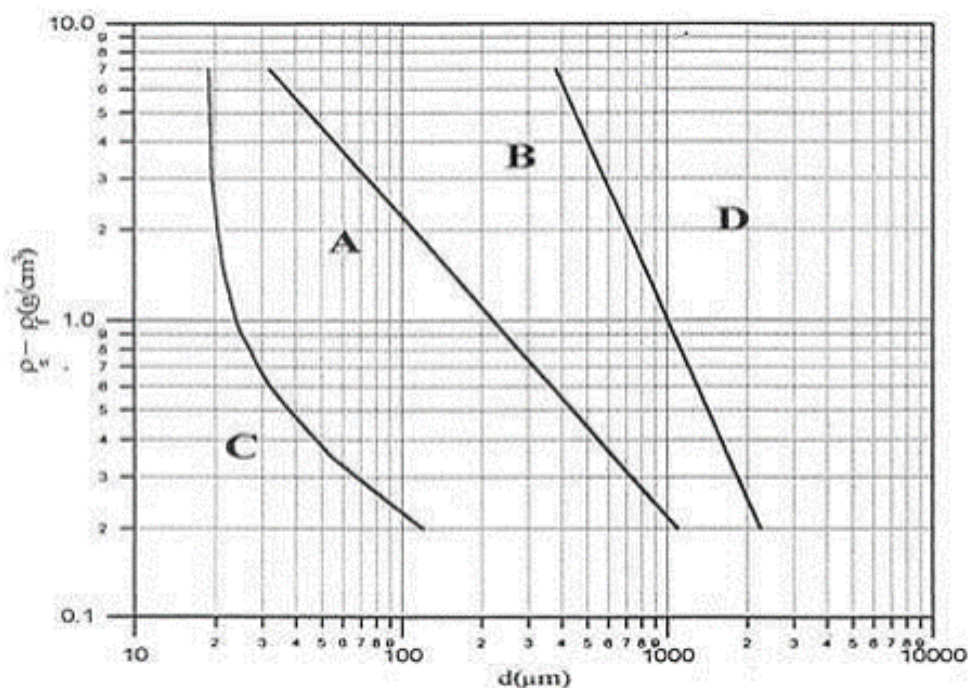


Figura 2.2 – Gráfico de Geldart com as classificações de grupos das partículas. Fonte: CARDOSO, 2008.

#### 2.4.2. Diâmetro Médio de Sauter

Uma das variáveis mais importantes em um leito fluidizado é o diâmetro médio das partículas. Por se apresentarem em grande quantidade, e por serem, muitas vezes muito pequenas para se medir individualmente; Sauter propôs uma maneira de estimar o diâmetro médio das partículas através de sua distribuição granulométrica, apresentada na Equação (2.1) (BORGES, 2017).

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum_i \frac{(\Delta x)_i}{D_i}} \quad (2.1)$$

na qual,  $\bar{D}$  é o diâmetro médio de Sauter,  $\Delta x$  a fração de massa das partículas com diâmetro menos que D e  $D_i$  o diâmetro médio de cada faixa de partículas.

#### 2.5. Conceitos e Equações Importantes Acerca da Fluidização Homogênea

Como toda operação unitária, a fluidização é regida por modelos matemáticos que variam de acordo com cada regime. A seguir é apresentada a modelagem matemática para a fluidização homogênea, a mesma que ocorre na unidade experimental do presente trabalho.

### 2.5.1. Modelo Matemático e Força Resistiva de Mínima Fluidização

A fluidização homogênea apresenta semelhanças com o escoamento de fluidos em leitos fixos. Para a descrição do modelo matemático da fluidização homogênea, seguem as seguintes hipóteses:

- a) A fase fluida comporta-se como um fluido newtoniano e incompressível;
- b) A fluidização ocorre em regime permanente, o que leva qualquer variação temporal ( $\partial/\partial t$ ) a ser nula;
- c) O escoamento ocorre unidimensionalmente;
- d) O meio poroso é isotrópico, ou seja, origina uma porosidade constante ao longo do leito.

A descrição equacional da fluidização homogênea origina-se de equações do movimento para ambas fases fluida e particulada, representadas pelas Equações (2.2) e (2.3) respectivamente.

$$\rho_f \varepsilon \left[ \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + \mathbf{u}_f \cdot \vec{\nabla} \mathbf{u}_f \right] = - \vec{\nabla} p_f + \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau}_f - \mathbf{m} - \rho_f \mathbf{g} \quad (2.2)$$

$$\rho_s \varepsilon_s \left[ \frac{\partial \mathbf{u}_s}{\partial t} + \mathbf{u}_s \cdot \vec{\nabla} \mathbf{u}_s \right] = - \vec{\nabla} p_s + \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{m} - (\rho_s - \rho_f) \varepsilon_s \mathbf{g} \quad (2.3)$$

onde,  $\varepsilon$  é a fração de vazios,  $\mathbf{u}_f$  o vetor velocidade da fase fluida,  $p_f$  a pressão exercida na fase fluida,  $\boldsymbol{\tau}_f$  o tensor tensão extra exercido na fase fluida,  $\mathbf{m}$  a força vetorial resistiva,  $\mathbf{g}$  a aceleração gravitacional,  $\varepsilon_s$  a fração volumétrica da fase sólida,  $\mathbf{u}_s$  o vetor velocidade da fase sólida,  $p_s$  a pressão exercida na fase sólida;  $\boldsymbol{\tau}_s$  o tensor tensão extra exercido na fase sólida.

Empregando as hipóteses acima, as equações de movimento são simplificadas obtendo-se:

$$-\frac{dp}{dz} - \rho_f g = m \quad (2.4)$$

$$m = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.5)$$

Observa-se que a força resistiva iguala-se ao peso aparente da fase particulada por unidade de volume. O peso aparente é a diferença entre o peso das partículas e o peso do fluido ascendente. Esse evento ocorre no início da fluidização e é caracterizado como sendo a força necessária que as partículas necessitam para sair do estado fixo para o fluidizado. Portanto, a Equação (2.5) pode ser reescrita como a Equação (2.6).

$$m_{mf} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.6)$$

na qual o subscrito  $mf$  indica a condição de mínima fluidização.

Uma outra maneira de descrever a força resistiva de mínima fluidização é através da velocidade intersticial. Em uma condição de fluidização homogênea, a velocidade intersticial (superficial) relativa entre as fases fluida e particulada é igual ao valor da fase fluida. Assim sendo, a força resistiva pode ser também representada pela Equação (2.7).

$$m_{mf} = \frac{\mu_f}{k} \left[ 1 + \frac{c \rho_f \sqrt{k}}{\mu_f} q_{mf} \right] q_{mf} \quad (2.7)$$

$$k = \frac{\varepsilon_{mf}^3 (\phi d)^2}{36 \beta (1 - \varepsilon_{mf})^2} \quad (2.8)$$

$$c = \Omega \varepsilon_{mf}^{-3/2} \quad (2.9)$$

em que,  $k$  é a constante de permeabilidade,  $\mu_f$  a viscosidade do fluido,  $q_{mf}$  a velocidade superficial em condição de mínima fluidização,  $\phi$  a esfericidade da partícula e  $c$ ,  $\beta$  e  $\Omega$  são constantes, descritas nas Equações (2.8) e (2.9).

### 2.5.2. Queda de Pressão em Condição de Mínima Fluidização

Considerando as hipóteses apresentadas em 2.5.1, e a definição de pressão piezométrica do fluido,  $P$ , tem-se a Equação (2.10).

$$-\frac{dP}{dz} = m \quad (2.10)$$

Integrando a Equação (2.10), tem-se, na condição de mínima fluidização, a Equação (2.11).

$$-\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = m_{mf} \quad (2.11)$$

onde,  $-\Delta P_{mf}$  é a queda de pressão e  $H_{mf}$  a altura do leito expandido.

Igualando as Equações (2.11) e (2.6) e rearranjando, tem-se a Equação (2.12), que relaciona a queda de pressão com o peso aparente do leito.

$$-\Delta P_{mf} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_f) g H_{mf} \quad (2.12)$$

Existem também outras formas de descrevê-la. A Equação (2.13) descreve a queda de pressão em função do peso do leito, onde  $\acute{Area} = \pi D^2/4$ .

$$-\Delta P_{mf} = \frac{gm_p}{\acute{Area}} \quad (2.13)$$

em que,  $\acute{Area}$  é a área de seção transversal do leito e  $D$  o diâmetro da coluna.

As Equações (2.14) a (2.15) as conectam utilizando a força resistiva de mínima fluidização e a velocidade intersticial, ao substituir a Equação (2.7) na Equação (2.11).

$$-\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = \frac{\mu_f}{k} \left[ 1 + \frac{c\rho_f\sqrt{k}}{\mu_f} q_{mf} \right] q_{mf} \quad (2.14)$$

Substituindo as Equações (2.8) e (2.9) na Equação (2.14), tem-se

$$-\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = 36\beta \left[ \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu_f}{(\phi d)^2} q_{mf} + 6\beta^{\frac{1}{2}} \Omega \left( \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\phi d)} q_{mf}^2 \quad (2.15)$$

ou, em termos da equação de Ergun, Equação (2.16),

$$-\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = 150 \left[ \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu_f}{(\phi d)^2} q_{mf} + 1,75 \left( \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\phi d)} q_{mf}^2 \quad (2.16)$$

uma vez que, na condição de mínima fluidização,  $36\beta = 150$  para partículas esféricas, ou  $36\beta = 180$  para partículas não esféricas.

### 2.5.3. Fração de Vazios do Leito em Condição de Mínima Fluidização

Igualando as Equações (2.12) e (2.13), pode-se obter o valor da fração de vazios na mínima fluidização na Equação (2.17). A fração de vazios na mínima fluidização é sempre superior a fração de vazios no leito fixo.

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_p}{H_{mf}(\text{Área})(\rho_s - \rho_f)} \quad (2.17)$$

onde,  $m_p$  é a massa de partículas contidas no leito.

#### 2.5.4. Velocidade Intersticial ou Superficial em Condição de Mínima Fluidização

A velocidade superficial pode ser encontrada através de rearranjos das equações exibidas, cujos exemplos podem ser demonstrados a seguir.

2.5.4.1. Igualando as Equações (2.13) e (2.15), tem-se a Equação (2.18).

$$\frac{gm_p}{\text{Área}} = 36\beta \left[ \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu_f}{(\phi d)^2} q_{mf} + 6\beta^{\frac{1}{2}} \Omega \left( \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\phi d)} q_{mf}^2 \quad (2.18)$$

2.5.4.2. Com a Equação (2.18) em termos de Ergun, tem-se a Equação (2.19).

$$\frac{gm_p}{\text{Área}} = 150 \left[ \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu_f}{(\phi d)^2} q_{mf} + 1,75 \left( \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\phi d)} q_{mf}^2 \quad (2.19)$$

2.5.4.3. Igualando as Equações (2.12) e (2.14), e substituindo as Equações (2.8) e (2.9), tem-se a Equação (2.20).

$$36\beta \left[ \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu_f}{(\phi d)^2} q_{mf} + 6\beta^{\frac{1}{2}} \Omega \left( \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\phi d)} q_{mf}^2 = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.20)$$

2.5.4.4. Com a Equação (2.20) em termos de Ergun, tem-se a Equação (2.21).

$$150 \left[ \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu_f}{(\phi d)^2} q_{mf} + 1,75 \left( \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\phi d)} q_{mf}^2 = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.21)$$

2.5.4.5. Uma vez que se trata da fluidização homogênea (meio isotrópico), as Equações (2.20) e (2.21) podem ser adimensionalizadas segundo a Equação (2.22).

$$K_1 Re_{pmf} + K_2 Re_{pmf}^2 = Ar \quad (2.22)$$

Em que o número de Reynolds das partículas na situação de mínima fluidização ( $Re_{pmf}$ ) pode ser definido pela Equação (2.23) e o número de Arquimedes ( $Ar$ ) pela Equação (2.24).

$$Re_{pmf} = \frac{dq_{mf}}{v_f} \quad (2.23)$$

$$Ar = \frac{\rho_f(\rho_s - \rho_f)gd^3}{v_f\mu_f^2} \quad (2.24)$$

onde,  $v_f$  é a viscosidade cinemática do fluido.

As constantes  $K_1$  e  $K_2$  são, respectivamente, as Equações (2.25) e (2.26).

$$K_1 = \frac{36\beta}{\phi^2} \left( \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \quad (2.25)$$

$$K_2 = \frac{1,75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \quad (2.26)$$

Os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  apresentados são aplicáveis para a faixa do número de Reynolds de  $0,001 < Re_{pmf} < 4000$ . Lacerda, Carvalho e Ataíde (2008) apresentam outros valores para os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ , através da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores para as constantes  $K_1$  e  $K_2$  (LACERDA; CARVALHO; ATAÍDE, 2008)

| Autores                 | $K_1/2K_2$ | $1/K_2$ | Observações                                                        |
|-------------------------|------------|---------|--------------------------------------------------------------------|
| Wen e Yu (1966)         | 33,7       | 0,0408  | A partir de dados encontrados na literatura.                       |
| Richardson (1971)       | 25,7       | 0,0365  | -                                                                  |
| Saxena e Vogel (1977)   | 25,3       | 0,0571  | Material: dolomita; válido para altas pressões de temperatura.     |
| Babu et al. (1978)      | 25,3       | 0,0651  | A partir de dados encontrados na literatura.                       |
| Grace (1982)            | 27,2       | 0,0408  | -                                                                  |
| Chitester et al. (1984) | 28,7       | 0,0494  | Materiais: carvão e esfera de vidro; para pressão acima de 64 bar. |

### 2.5.5. Curva Característica da Fluidização Homogênea e Determinação da Velocidade de Mínima Fluidização

A curva característica da fluidização homogênea relaciona a queda de pressão em função da velocidade superficial do fluido, conforme apresentado na Figura (2.3).

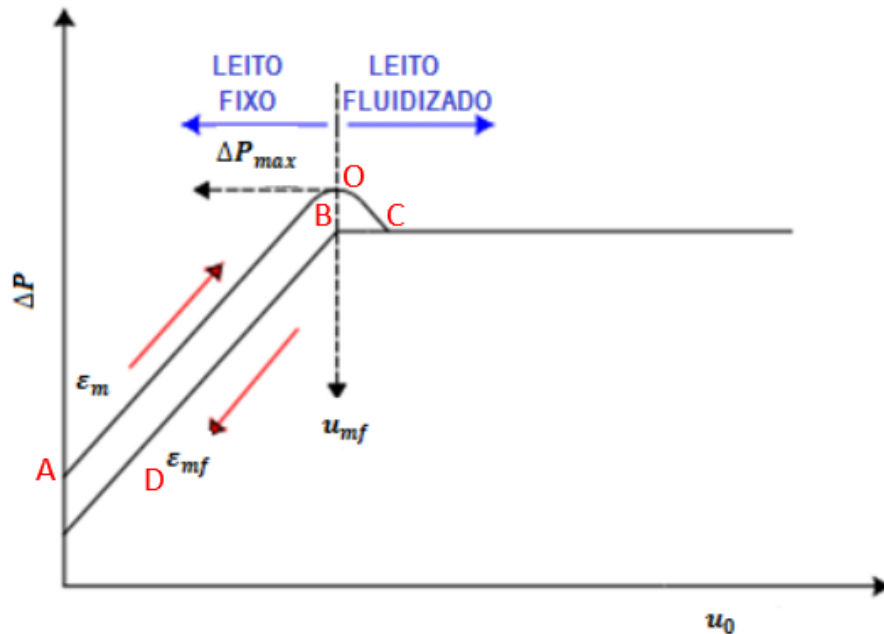


Figura 2.3 – Curva característica da fluidização homogênea. Fonte: PARISE, 2007.

Inicialmente, a uma baixa velocidade, o leito apresenta características semelhantes ao regime fixo, ou seja, a queda de pressão aumenta, mas não ocorrem grandes expansões na altura da coluna (segmento AB). Ao atingir a velocidade de mínima fluidização, pode-se observar a maior queda de pressão ( $\Delta P_{máx}$ ) em seu comportamento (ponto O) (CASTILHO, 2011). Qualquer incremento à velocidade após a condição de mínima fluidização, o leito passa a ser caracterizado pelo regime de fluidização; o mesmo expande; e ocorre uma redução (diminuição) na queda de pressão (segmento OC) e tende a se estabilizar.

Assim que o leito se estabiliza, outro comportamento pode ser obtido. Ao se diminuir a velocidade até o limite de mínima fluidização, não será observado um ponto de alta queda de pressão como anteriormente. O ponto de maior queda de pressão ocorre pois o fluido precisa vencer as forças resistivas do leito para a flutuação das partículas em sua superfície. Quando a velocidade é diminuída, o fluido não precisa mais vencer essa resistência, e por isso, ao atingir uma velocidade inferior à de mínima fluidização, ele não obedece à curva AB, e sim à curva D.

Suas partículas se acomodarão e a queda de pressão será governada por equações que descrevem a fluidodinâmica em leito fixo, contudo apresentando o valor da fração de vazios maior do que aquele em leito fixo ( $\varepsilon_{mf}$ ). Nesse momento, é reconhecido que o leito entra no regime expandido (CREMASCO, 2012).

Ao analisar a curva característica da fluidização homogênea (Figura 2.3) deve-se ter cautela. A curva característica apresenta um comportamento contrário à lógica da situação. Quando o gráfico expande, o leito está em regime de leito fixo, não havendo alteração da altura da coluna ou fluidização. Quando o gráfico se estabiliza, o leito entra em regime fluidizado.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade experimental empregada para a realização dos experimentos está localizada no Laboratório Didático 2 da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI-UFU). A prática de leito fluidizado passou por diversas mudanças desde 2017 até o momento do presente trabalho. A unidade encontrava-se desativada, havendo a necessidade de uma total readequação da mesma.

#### 3.1. Unidade Experimental

O aparato experimental original era constituído pelos acessórios, Figuras (3.1) e (3.2):

- **02 Colunas de Leito Fluidizado**, em acrílico, estando uma conectada ao aparato, e outra não. Ambas colunas estavam preenchidas com microesferas de vidro (vermelho e transparente) de diâmetro médio de 0,848 mm. Os leitos apresentavam certa dificuldade de manuseio (montagens e desmontagens) para trocas de meios porosos e limpezas em geral. O leito da esquerda do aparato foi denominado como Leito 1 e o da direita, como Leito 2;
- **02 Medidores de Pressão**, tipo manômetro de Tubo em ‘U’, sem fluido manométrico e desconectados da unidade;
- **01 Medidor de Vazão**, tipo rotâmetro para as condições normais de temperatura e pressão: 15°C e 101.325 kPa;
- **01 Barrilete**, em PVC de marca Union, com capacidade de 100L;

- **01 Motor de Indução Monofásico de Gaiola**, tipo 1/3 HP e com 3500 RPM da marca Nova cujo sentido de rotação era anti-horário;
- **06 Mangueiras**, tipo silicone atóxico semitransparentes e  $\frac{3}{4}$ " de diâmetro.



Figura 3.1 – Unidade experimental original. Fonte: BORGES, 2017.



Figura 3.2 – Reservatório de água e bomba da unidade experimental original. Fonte: BORGES, 2017.

Originalmente, a bomba quando ligada, transferia o fluido (água) do barrilete para o leito fluidizado. O reator era conectado ao medidor de vazão e ao medidor de pressão, cujas variações eram anotadas ao longo do tempo.

Esse aparato apresentava problemas como: vazamentos nas duas colunas, arraste de partículas, presença de bolhas nas mangueiras (que afetavam as medidas experimentais), resultados não condizentes com a teoria da fluidização e manômetros ineficientes nas medidas. O Leito 1 não fluidizava devido à grande perda de carga e baixa vazão de água. O Leito 2 apresentava entradas de ar secundárias e que se misturavam ao sistema, realizando uma fluidização borbulhante não confiável.

### 3.2. Material Particulado Utilizado

A universidade possui uma grande variedade de diâmetros do material. O vidro foi escolhido por ser um sólido inerte e não perder massa facilmente. Além disso, suas propriedades são bem conhecidas e definidas na literatura. As esferas de vidro foram peneiradas com as peneiras de 150 a 250 Mesh, de acordo com a Figura (3.3).



Figura 3.3 – Peneiras utilizadas no peneiramento das esferas de vidro da unidade. Fonte: Própria.

### 3.3. Propriedades do Fluido e Material Particulado

As propriedades do fluido de trabalho e do material particulado utilizadas podem ser visualizadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades do fluido e material particulado. Fonte: (Green e Perry, 1934).

|                                                | Ar            | Vidro |
|------------------------------------------------|---------------|-------|
| $\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$              | $1,2.10^{-3}$ | 2,5   |
| $\theta$                                       | -             | 1,0   |
| $\mu \text{ (g.cm}^{-1}\text{.s}^{-1}\text{)}$ | $1,8.10^{-4}$ | -     |

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Primeira Adaptação

Em sua primeira adaptação, a unidade experimental foi remontada com apenas um leito, que foi totalmente refeito (Figura 4.1). Foram adicionadas telas no topo e fundo do leito, para evitar o arraste de partículas e a água foi mantida como fluido de trabalho.

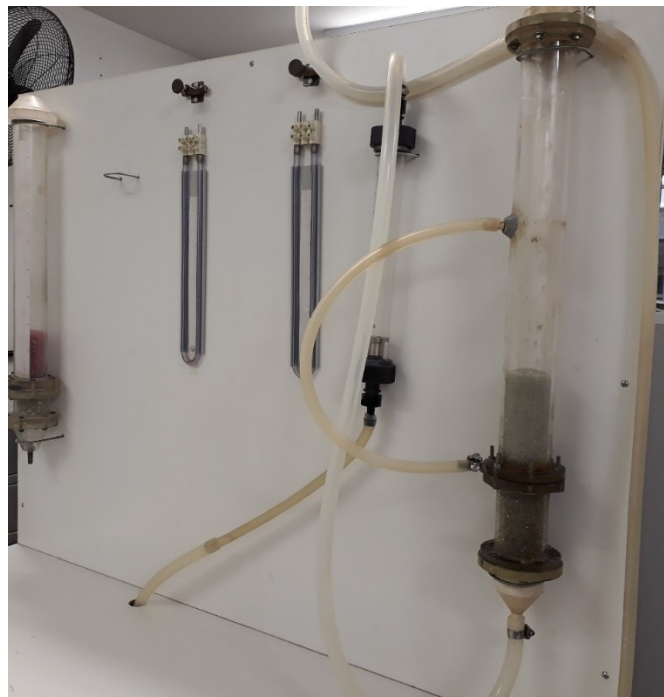


Figura 4.1 – Leito fluidizado (direita) da primeira adaptação da unidade. Fonte: Própria.

Após esta adaptação, o aparato ainda apresentava entradas de ar em uma das tomadas de pressão e na bomba. Também foi constatado que as esferas de vidro utilizadas entravam na classificação do grupo B de Geldart, e que contribuíam para uma fluidização ineficiente (Figura 4.2). Para solucionar estas questões, optou-se por consertar as entradas de ar, trocar a bomba de água e utilizar esferas de vidro de menor diâmetro.

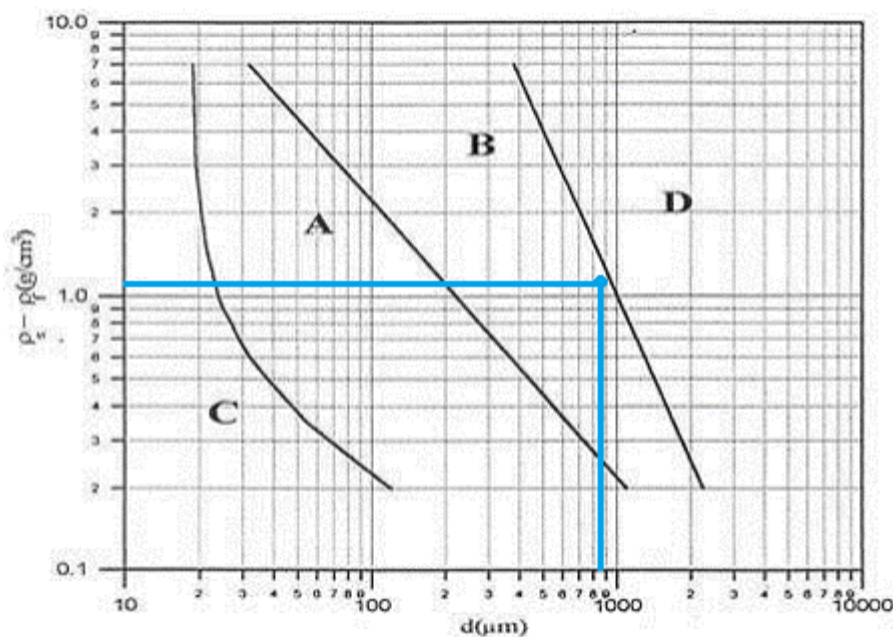


Figura 4.2 – Classificação de Geldart do aparato experimental original, com diâmetro médio de 0,848 mm e água.

## 4.2. Segunda Adaptação

O material particulado foi substituído por esferas com diâmetro médio de 79,7  $\mu\text{m}$ , totalizando 185 g de partículas no leito. A bomba da unidade foi trocada. Ao tentar consertar a entrada de ar na tomada de pressão, o leito acabou sendo trincado. Constatou-se, ao fazer um teste, que a nova bomba era muito forte para a unidade, fazendo com que a vazão e a pressão dentro do leito fossem muito altas, resultando em uma fluidização borbulhante.

Optou-se por substituir o fluido de trabalho para o ar e refazer o leito. As esferas de vidro precisaram ser secas em estufa e pesadas novamente.

## 4.3. Terceira Adaptação

Ao realizar novos testes com o ar e as esferas secas e pesadas (totalizando 163 g) (Figura 4.3), constatou-se que era necessária uma válvula redutora de pressão com filtro e com

manômetro para a leitura. Um rotâmetro novo foi instalado, mas ao fazer o primeiro teste da unidade não ocorria variação de vazão. O rotâmetro foi trocado para um de menor range, e mesmo com muita flutuação, foi possível conseguir medidas a partir dele (Figura 4.4).



Figura 4.3 – Leito fluidizado final. Fonte: Própria.



Figura 4.4 – Rotâmetro utilizado durante terceira adaptação da unidade. Fonte: Própria.

#### 4.4. Quarta Adaptação

Para a última adaptação na unidade, foram adquiridos dois transmissores de pressão da marca Pressgage, modelo TP1 Press com range 0 a 50 mbar (Figura 4.5) e um manômetro da marca Fluir Pneumática de range 0,05 a 1,0 Mpa (Figura 4.6), uma vez que o rotâmetro era muito instável. A unidade passou a transmitir os dados para o *software* LabView com a placa de aquisição de dados da National Instruments (Figuras 4.7 e 4.8) e o seu *layout* final foi ajustado (Figura 4.9).



Figura 4.5 – Transmissores de pressão da marca Pressgage. Fonte: Própria.



Figura 4.6 – Manômetro da marca Fluir Pneumática. Fonte: Própria.



Figura 4.7 – Placa de aquisição de dados da marca National Instruments. Fonte: Própria.



Figura 4.8 – Tela do *software* LabView. Fonte: Própria.

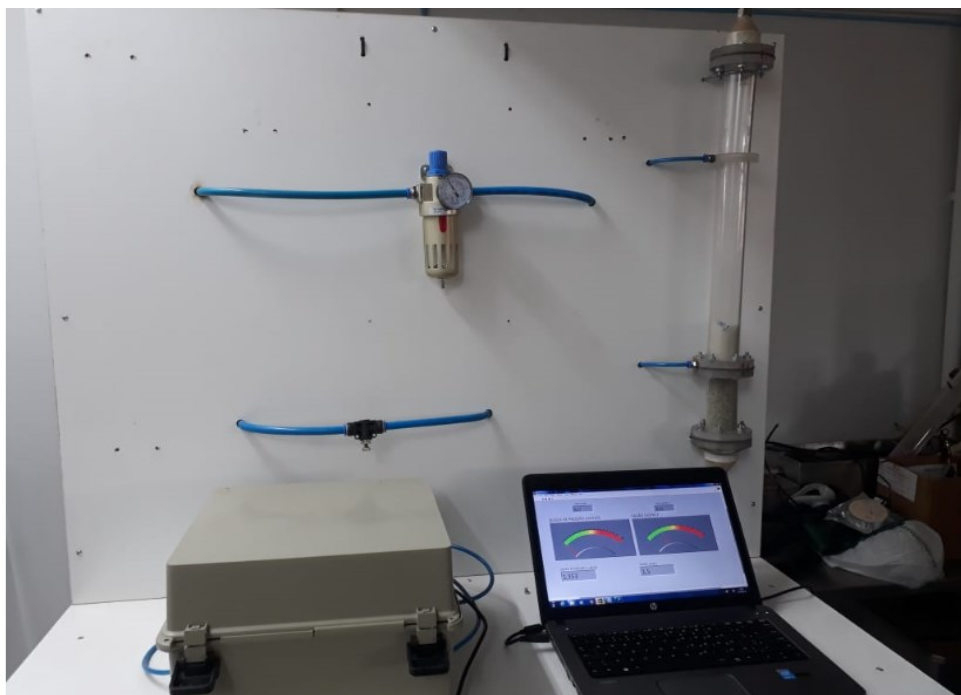


Figura 4.9 – *Layout* final da unidade experimental de leito fluidizado. Fonte: Própria.

#### 4.5. Análise Granulométrica

O diâmetro médio das esferas foi determinado a partir da análise granulométrica. A amostra inicial de esferas ( $m_p$ ) continha 163g. As esferas foram peneiradas com os Meshs de 150 a 250, representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Análise granulométrica do material particulado

| Mesh/ Tyler  | Abertura (mm) | Peso (g)   | $\Delta X$ |
|--------------|---------------|------------|------------|
| +150         | 0,106         | 5,78       | 0,035      |
| -150 +170    | 0,090         | 2,73       | 0,017      |
| -170 +200    | 0,075         | 91,90      | 0,564      |
| -200 + 250   | 0,063         | 62,59      | 0,384      |
| Fundo        | 0             | 0          | 0          |
| <b>Total</b> |               | <b>163</b> | <b>1</b>   |

A obtenção do diâmetro médio de Sauter, de acordo com a Equação (2.1) pode ser observadas nas Equações (4.1) a (4.4).

$$\bar{D} = \frac{1}{\left[ \frac{0,035}{\frac{\infty+0,106}{2}} \right] + \left[ \frac{0,017}{\frac{0,106+0,09}{2}} \right] + \left[ \frac{0,564}{\frac{0,09+0,075}{2}} \right] + \left[ \frac{0,384}{\frac{0,075+0,063}{2}} \right] + \left[ \frac{0}{\frac{0,063+0}{2}} \right]} \quad (4.1)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{\left[ \frac{0,017}{0,098} \right] + \left[ \frac{0,564}{0,083} \right] + \left[ \frac{0,384}{0,069} \right]} \quad (4.2)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{[0,173] + [6,795] + [5,565]} \quad (4.3)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{12,533} = 0,0797 \text{ mm} = 79,7 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.4)$$

#### 4.6. Classificação de Geldart do Material Particulado

A partir da definição do diâmetro médio das esferas de vidro (79,7  $\mu\text{m}$ ), e sabendo-se que a diferença entre a densidade do sólido e do fluido na prática é de 2,498  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (apresentados na seção 3.3), pode-se observar que a classificação de Geldart para o material particulado da unidade é o Grupo A (Figura 4.10). Portanto, deve-se esperar uma fluidização do tipo homogênea no leito com formação de pequenas bolhas.

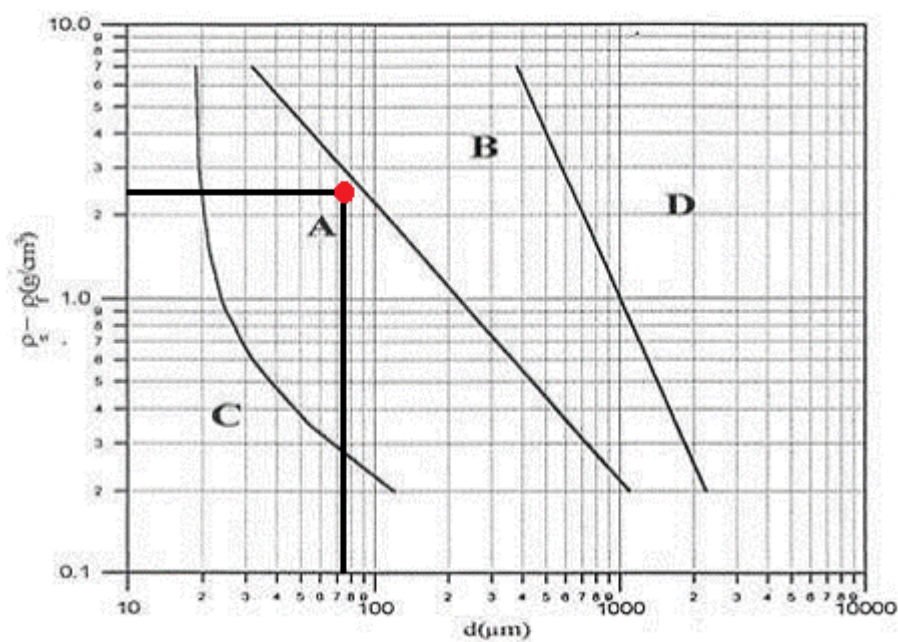


Figura 4.10 – Classificação de Geldart do material particulado da unidade. Fonte: Própria.

#### 4.7. Procedimento Experimental

Inicialmente, abriu-se a válvula de ar a qual a unidade experimental é ligada. Após isso, girou-se o controlador de vazão de ar para o sentido horário (de maneira cautelosa, uma vez que o controlador é muito sensível) e verificou-se o aumento da vazão sob o leito através da tela no *software* LabView. A medida em que aumentou-se a vazão, a queda de pressão aumentou, até que a primeira chegou em seu limite máximo de  $5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Ao girar o controlador de vazão no sentido anti-horário, a vazão passou a diminuir e junto dela, a queda de pressão. Ao final do experimento, fechou-se a válvula de ar. Plotou-se o gráfico do aumento da vazão versus a queda de pressão, e da curva de volta, obtendo-se a curva característica da fluidização do aparato experimental. O Roteiro proposto para a prática experimental de leito fluidizado encontra-se no Apêndice A.

#### 4.8. Dimensões Características do Leito Fluidizado e Equação Característica

A Tabela 4.2 apresenta as dimensões características do leito fluidizado consideradas nos cálculos deste trabalho.

Tabela 4.2 – Dimensões características do leito fluidizado utilizado

| Leito Fluidizado      |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| <b>H<sub>mf</sub></b> | 6,0 cm                |
| <b>D</b>              | 5,2 cm                |
| <b>Área</b>           | 21,24 cm <sup>2</sup> |

A altura do leito expandido ao atingir a condição de mínima fluidização ( $H_{mf}$ ) foi obtida durante a prática experimental da unidade.

A partir da Equação (2.17), pode-se obter uma relação entre a queda de pressão e a vazão de fluido. Utilizando as propriedades do fluido e do material particulado apresentados na seção 3.3 e as dimensões características do leito; obtém-se as Equações (4.5) e (4.6).

$$\frac{-\Delta P}{6} = 150 \left[ \frac{(1-0,938)^2}{0,938^3} \right] \frac{1,8 \cdot 10^{-4}}{(7,97 \cdot 10^{-3})^2} q_{mf} + 1,75 \left[ \frac{1-0,938}{0,938^3} \right] \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{7,97 \cdot 10^{-3}} q_{mf}^2 \quad (4.5)$$

$$-\Delta P = 11,874q_{mf} + 0,119q_{mf}^2 \quad (4.6)$$

A Equação (4.6) serve para vazões em  $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$  e queda de pressão em  $\text{din.cm}^{-2}$ . Para vazões em  $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$  e queda de pressão em  $\text{cmH}_2\text{O}$  obtém-se a Equação (4.7).

$$-\Delta P = 2,275q_{mf} + 0,0869q_{mf}^2 \quad (4.7)$$

Após executar a prática experimental na unidade de leito fluidizado, foram obtidos os dados de queda de pressão tanto para o aumento da vazão de ar quanto para a diminuição desta vazão, apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dados coletados do experimento

| Aumento da Vazão de Ar                     |                                             | Diminuição da Vazão de Ar                  |                                             |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Vazão de Ar ( $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ) | Queda de Pressão ( $\text{cmH}_2\text{O}$ ) | Vazão de Ar ( $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ) | Queda de Pressão ( $\text{cmH}_2\text{O}$ ) |
| 1,5                                        | 1,32                                        | 4,1                                        | 9,56                                        |
| 1,6                                        | 1,87                                        | 3,8                                        | 9,32                                        |
| 1,7                                        | 2,34                                        | 3,6                                        | 9,34                                        |
| 1,8                                        | 3,43                                        | 3,5                                        | 9,17                                        |
| 1,9                                        | 4,03                                        | 3,4                                        | 9,12                                        |
| 2,0                                        | 4,68                                        | 3,3                                        | 9,15                                        |
| 2,2                                        | 5,37                                        | 3                                          | 9,14                                        |
| 2,3                                        | 6,30                                        | 2,8                                        | 9,24                                        |
| 2,4                                        | 6,89                                        | 2,7                                        | 8,98                                        |
| 2,6                                        | 7,73                                        | 2,6                                        | 8,67                                        |
| 2,8                                        | 9,39                                        | 2,5                                        | 7,99                                        |
| 2,9                                        | 9,13                                        | 2,4                                        | 7,62                                        |
| 3,1                                        | 9,29                                        | 2,3                                        | 6,86                                        |
| 3,3                                        | 9,28                                        | 2,2                                        | 6,14                                        |
| 3,4                                        | 9,22                                        | 2,1                                        | 5,46                                        |
| 3,6                                        | 9,25                                        | 2,0                                        | 5,12                                        |
| 3,7                                        | 9,42                                        | 1,9                                        | 4,51                                        |
| 3,8                                        | 9,40                                        | 1,8                                        | 3,71                                        |
| 3,9                                        | 9,52                                        | 1,7                                        | 2,62                                        |
| 4,0                                        | 9,53                                        | 1,6                                        | 2,04                                        |
| 4,1                                        | 9,56                                        | 1,5                                        | 1,41                                        |

A partir dos resultados, foi possível plotar a curva característica do experimento, representada pela Figura (4.11).

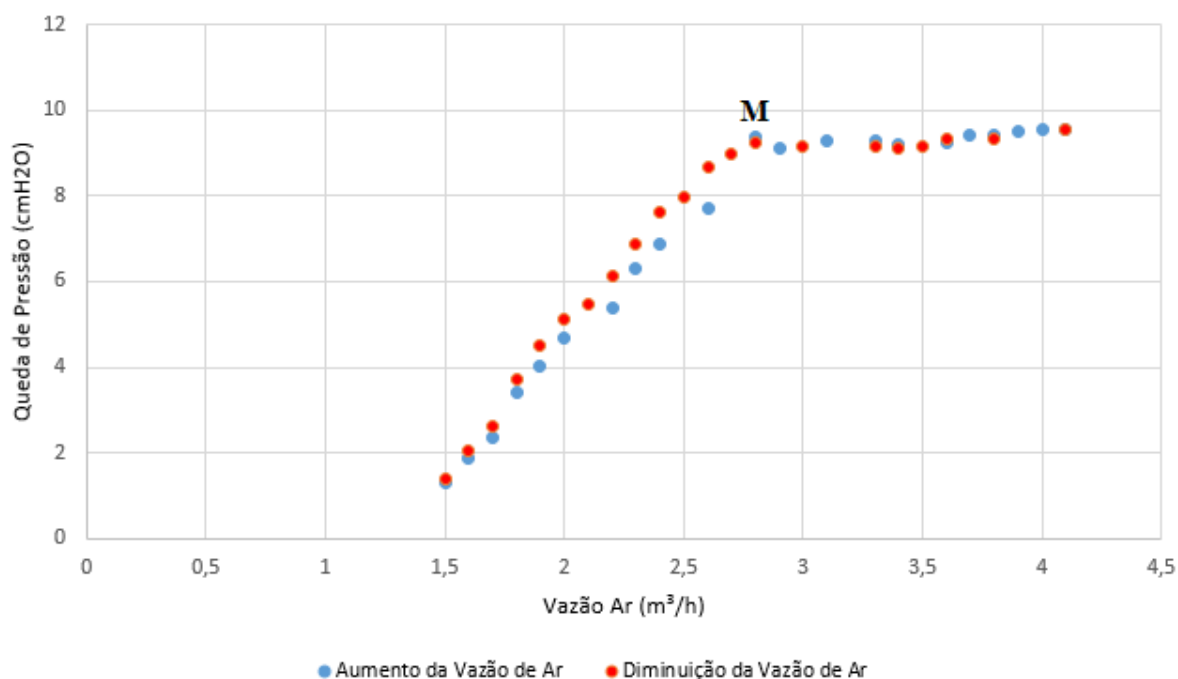


Figura 4.11 – Curva característica da unidade experimental de leito fluidizado. Fonte: Própria.

Durante o incremento da velocidade (pontos em azul), a fluidização se comportou como em um regime fixo, não havendo grande expansão do leito (6 cm), devido à baixa vazão de ar. Ao atingir o ponto M (2,8;9,36), observou-se na curva característica que o ponto de máxima queda de pressão foi 9,36 cmH<sub>2</sub>O e a vazão de mínima fluidização da unidade experimental foi 2,8 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Conforme o aumento da vazão observou-se o surgimento de bolhas e a curva característica se estabilizou em uma queda de pressão média de 9,4 cmH<sub>2</sub>O.

Com a diminuição da vazão (pontos em vermelho), a curva característica se comportou mais suavemente, já que as esferas de vidro uma vez expandidas tendem a se acomodar conforme a vazão diminui.

Pôde-se observar também que as curvas de aumento e diminuição de vazão ficam mais próximas que as curvas da literatura (Figura 4.12). Isto se deve ao nível de compactamento da unidade experimental. Quando a unidade não é utilizada por alguns dias, as esferas de vidro se depositam de forma mais compacta que quando a unidade é usada várias vezes ao longo da semana.

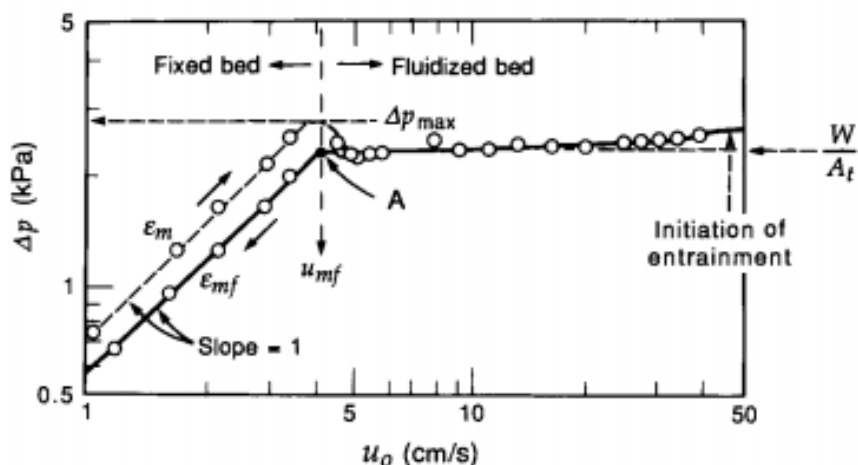


Figura 4.12 – Curva característica da fluidização da literatura. Fonte: KUNII e LEVENSPIEL, 1923.

## 5. CONCLUSÕES

A unidade experimental de leito fluidizado, após as adaptações, provou-se fidedigna à teoria de fluidização. A curva característica do experimento revela que o leito inicialmente apresentou características de regime fixo, com pouca expansão. Após o ponto de máxima queda de pressão, o leito se expandiu e observou-se a formação de bolhas. Ao diminuir a vazão, o leito vence a curva de forma suave, acomodando as partículas.

A escolha de se trabalhar com o ar como fluido também foi assertiva. Não apenas é um sistema mais simples de se trabalhar, como também de menor custo. Para que a água fosse utilizada como fluido de trabalho, uma bomba de menor capacidade deveria ser adquirida. Um material particulado de menor diâmetro também foi importante, pois contribuiu para que a fluidização da unidade fosse uniforme.

A unidade, assim sendo, se encontra em perfeito estado para ser utilizada nas práticas da disciplina de Laboratório de Engenharia Química 1. É importante destacar que a prática de leito fluidizado englobará além da operação do leito e seu controle de vazão, técnicas de determinação de análise granulométrica, diâmetro de Sauter e manuseio de ferramentas importantes como Excel e LabView. O aluno em contato com essa prática, não somente aplicará a teoria aprendida em sala de aula como também poderá enxergar diversas utilizações para o

fenômeno da fluidização, uma tecnologia em ascendência na indústria e a cada dia mais estudada.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BORGES, P. W. **Readequação da prática de laboratório de engenharia química 1: leito fluidizado**. Uberlândia, UFU, 2017.

CASTILHO, G. J. **Análise de caos em leito fluidizado circulante**. Campinas, UNICAMP, 2011.

CARDOSO, C. R. **Arraste de partículas finas em um leito fluidizado e eficiência de coleta em um ciclone *dipleg***. Uberlândia, UFU, 2008.

COSTA, C. L. **Caracterização e análise experimental do recobrimento de sementes de jambu (*Spilanthes oleracea*) em leito fluidizado**. Campinas, UNICAMP, 2010.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 2012.

DA SILVA, D. P. **Estudo do comportamento fluidodinâmico da celulose microcristalina em leito fluidizado**. Campinas, UNICAMP, 2000.

DE OLIVEIRA, T. P. **Pirólise rápida de casca de soja: desenvolvimento do reator de leito fluidizado, análise do bio-óleo produzido e do vapor obtido na pirólise analítica**. Uberlândia, UFU, 2015.

DE SANT'ANNA, M. S. **Simulação hidrodinâmica de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante**. Recife, UFPE, 2015.

DE VASCONCELOS, P. S. **Transporte pneumático fluidizado: estudos de casos aplicados à indústria do alumínio primário**. Belem, UFPA, 2011.

DECHSIRI, C. **Particle transport in Fluidized beds**. Groningen, University of Groningen, Chapter 2, 2004.

FERNANDO, A. L. **Análise wavelet aplicada a sinais de flutuação de pressão em leito fluidizado**. Campinas, UNICAMP, 2018.

GEBARA, D. **Desempenho de um reator aeróbio de leito fluidizado no tratamento de esgoto sanitário**. São Paulo, USP, 2006.

GREEN, D. W.; PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. Eighth Edition, 1934.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. Second Edition, 1923.

LACERDA JÚNIOR, W. M.; CARVALHO, F. M.; ATAÍDE, C. H. **Caracterização de regimes de fluidização através da análise de flutuação de pressão.** Uberlândia, UFU, 2008.

LUZ, N. C. **Estudo da transferência de calor em leito fluidizado: análise numérica e experimental.** Rio Grande, FURG, 2015.

NITZ, M.; GUARDANI, R. **Fluidização gás-sólidos: fundamentos e avanços.** Revista Brasileira de Engenharia Química, 2008.

PARISE, M. R. **Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido.** Campinas, UNICAMP, 2007.

PAULO, B. B. **Estratégias para produção de partículas lipídicas em leito fluidizado.** Campinas, UNICAMP, 2017.

PRIETO, W. H. **Aplicação da teoria do caos em um leito fluidizado, utilizando-se partículas A, B e D da classificação Geldart.** Campinas, UNICAMP, 2014.

RIBAS, R. M. **Projeto, desenvolvimento, otimização e scale-up de um leito fluidizado para classificação de fosfato bicálcico microgranulado.** Uberlândia, UFU, 2006.

SANTOS, J. P. **Desenvolvimento experimental e validações do processo catalítico (Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de reforma metano-dióxido de carbono em reator de leito fluidizado.** Recife, UFPE, 2009.

SCATENA, R. **Análise do caos em flutuações de pressão oriundas de modelagem CFD na condição de mínima fluidização em leito fluidizado.** Campinas, UNICAMP, 2018.

SILVA, C. M. **Aplicação de tecnologias analíticas de processo e inteligência artificial para monitoramento e controle de processo de recobrimento de partículas em leito fluidizado.** Campinas, UNICAMP, 2015.

VALDO, V. P. **Atrito de partículas sólidas de cloreto de sódio (NaCl) em leito fluidizado gasoso.** Campinas, UNICAMP, 2008.

VIEGAS, M. C. **Desenvolvimento de um reator de bancada de leito fluidizado para produção de etanol utilizando linhagens de leveduras floculantes.** Campinas, UNICAMP, 1999.

VISSOTTO, J. P. **Cogaseificação de serragem de *pinus* e lodo de esgoto em leito fluidizado.** Campinas, UNICAMP, 2013.

## **APÊNDICE A**

### **Roteiro proposto para a prática de Leito Fluidizado**

#### **UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**Faculdade de Engenharia Química**

***Laboratório de Engenharia Química I***

#### **Título: Leito Fluidizado**

### **1- Objetivo**

Observar o comportamento da unidade experimental de leito fluidizado e determinar sua curva característica. Determinar, através de análise granulométrica, o diâmetro médio de Sauter e a classificação de Geldart do material particulado.

### **2- Fundamentos Teóricos**

A fluidização consiste em um fluido ascendente, sendo líquido ou gás, sobre um leito de partículas sólidas, suportadas ou apoiadas por uma placa distribuidora de fluido, permitindo assim o fluido ascender igualmente pelo leito. Dependendo das características do fluido, da partícula e do leito construído, ao se aumentar gradualmente a velocidade do fluido, regimes de fluidização governarão, oferecendo diversas características interessantes e únicas da fluidização. Apresenta também um variado leque de aplicações como: secagem, recobrimento, mistura, aquecimento, resfriamento de sólidos, entre outros. A Figura 1 apresenta os regimes de fluidização.

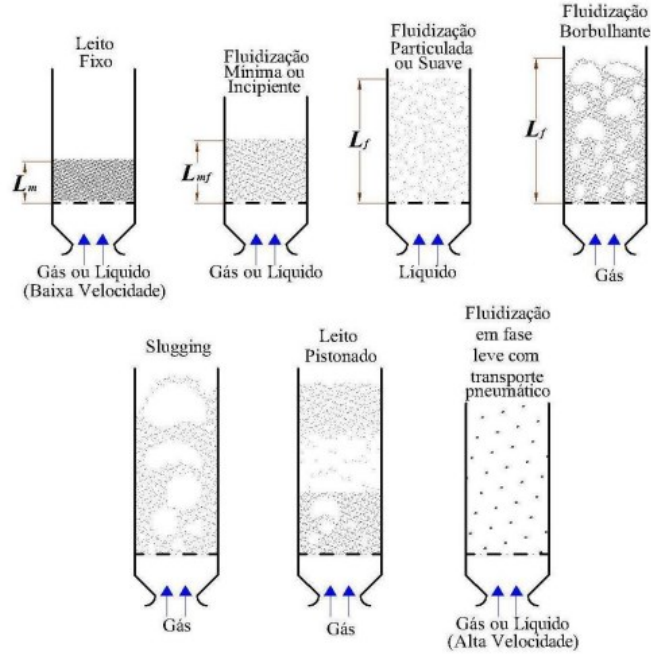


Figura 1 – Regimes de fluidização. Fonte: VISSOTTO, 2013.

As Equações (1) a (3) regem a fluidização.

$$-\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = 150 \left[ \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu_f}{(\phi d)^2} q_{mf} + 1,75 \left( \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\phi d)} q_{mf}^2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_p}{H_{mf}(\text{Área})(\rho_s - \rho_f)} \quad (2)$$

$$\text{Área} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

onde,  $-\Delta P_{mf}$  é a queda de pressão,  $H_{mf}$  a altura do leito expandido,  $\varepsilon_{mf}$  é a fração de vazios,  $\mu_f$  a viscosidade do fluido,  $\phi$  a esfericidade da partícula,  $d$  o diâmetro médio das partículas,  $q_{mf}$  a velocidade superficial,  $\rho_f$  a densidade do fluido,  $m_p$  a massa de partículas contidas no leito,  $\rho_s$  a densidade do sólido,  $\text{Área}$  a área de seção transversal do leito,  $D$  o diâmetro da coluna e o subscrito  $mf$  indica a condição de mínima fluidização.

## 2.1. Classificação das Partículas Sólidas (Grupos A, B, C e D) e Gráfico de Geldart

Geldart, em 1973, classificou a grande variedade de materiais particulados em quatro grupos, de A a D, identificáveis por seu tamanho e densidade distintos, e que apresentam comportamentos diferentes quando fluidizados.

O grupo A (Aeráveis) apresenta expansão considerável e homogênea no leito. Um exemplo de material desse grupo é o FCC (Fluidized Catalytic Cracking). As partículas do grupo B (Areia) tendem a gerar bolhas já na mínima fluidização, fazendo com que o borbulhamento seja mais vigoroso. É neste grupo que se encontram grande parte dos sólidos utilizados em leitos fluidizados industriais e a areia. Os sólidos do grupo C (Coesivos) são finos, altamente coesivos e de difícil fluidização. Seus exemplos conhecidos são a farinha de trigo, amido, pós-faciais e o cimento. E por último, o grupo D (Jorro) é composto pelas maiores partículas, apresentando baixas expansões e surgimento de caminhos preferenciais. Os grãos de soja, feijões, café, ervilha, arroz e fármacos são exemplos dessas partículas.

A Figura 2 representa o gráfico de Geldart, em que é possível, através da massa específica do fluido, da massa específica da partícula e do diâmetro da partícula, obter a classificação do sólido.

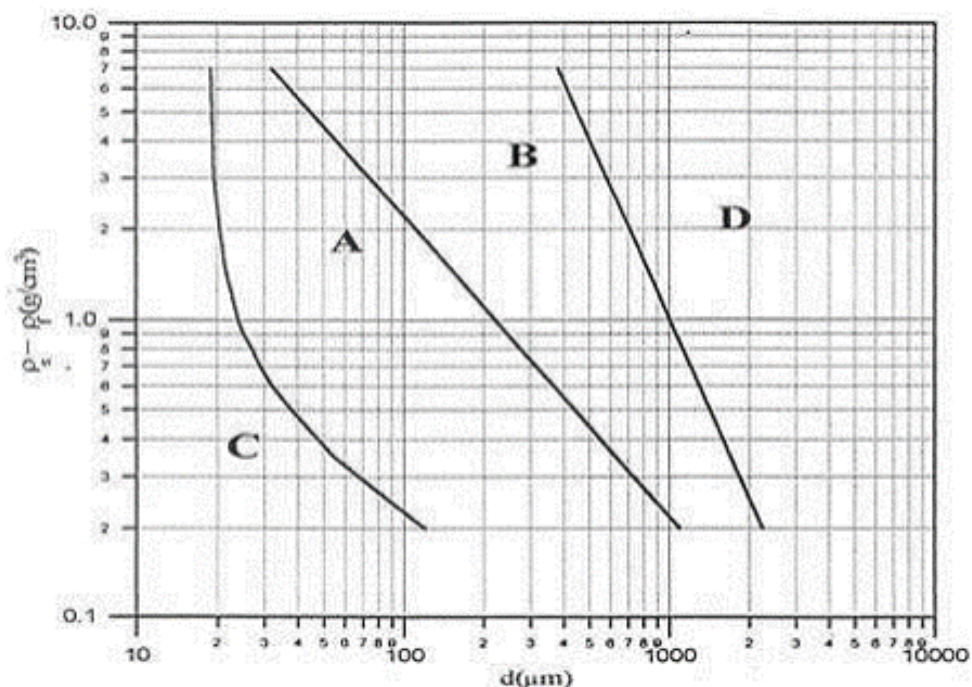


Figura 2 – Gráfico de Geldart com as classificações de grupos das partículas. Fonte: CARDOSO, 2008.

A fluidização ideal representada pela região A de Geldart apresenta uma curva característica da queda de pressão no leito pela vazão do fluido, onde se nota a região de expansão de leito até a velocidade de mínima fluidização, depois o regime de fluidização e por último o arraste de partículas, conforme a Figura 3.

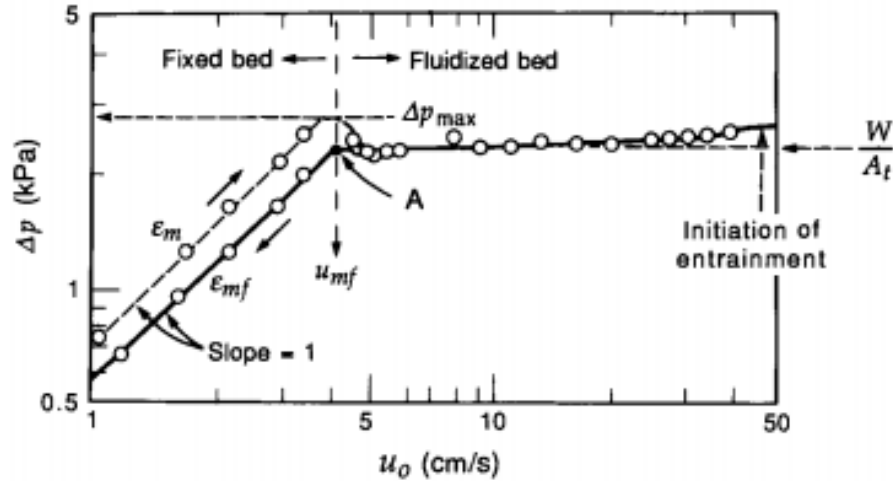


Figura 3 – Curva Característica de Fluidização. Fonte: (KUNII e LEVENSPIEL, 1923).

## 2.2. Diâmetro Médio de Sauter

Uma das variáveis mais importantes em um leito fluidizado é o diâmetro médio das partículas. Por se apresentarem em grande quantidade, e por serem, muitas vezes muito pequenas para se medir individualmente; Sauter propôs uma maneira de estimar seu diâmetro médio, através de sua distribuição granulométrica, apresentada na Equação (4).

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum_i \frac{(\Delta x)_i}{D_i}} \quad (4)$$

na qual,  $\bar{D}$  é o diâmetro médio de Sauter,  $\Delta x$  a fração de massa das partículas com diâmetro menor que  $D$  e  $D_i$  o diâmetro médio de cada faixa de partículas.

## 3- Materiais

Os materiais necessários para a execução do procedimento são:

- Sólido particulado (esferas de vidro);
- Leito fluidizado;
- Controlador de vazão;
- Manômetro;
- Transmissores de pressão;
- Placa de aquisição de dados;
- *Software* LabView.

#### 4- Procedimento Experimental

- Inicialmente, deve-se abrir a válvula de ar a qual a unidade experimental é ligada;
- Girar o controlador de vazão de ar para o sentido horário (de maneira cautelosa, uma vez que o controlador é muito sensível) e verificar o aumento da vazão sob o leito através da tela no *software* LabView;
- Aumentar a vazão lentamente, de modo que a queda de pressão também aumente, anotando os pontos, até que a vazão chegue em seu limite máximo de  $5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;
- Diminuir a vazão lentamente, girar o controlador de vazão no sentido anti-horário, anotando os pontos;
- Ao final do experimento, fechar a válvula de ar;
- Plotar o gráfico do aumento da vazão versus queda de pressão, e da diminuição da vazão versus queda de pressão (curva característica do leito fluidizado);
- Obter dados do diâmetro da coluna e da altura do leito expandido.

#### 5- Tratamento de Dados

Utilizar os seguintes dados para o tratamento de dados, de acordo com Green e Perry, 1934:  $\rho_{ar} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\rho_{vidro} = 2,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\phi = 1$ ;  $\mu_{ar} = 0,018 \text{ cP}$ .

Utilizar também análise granulométrica do material particulado representada na Tabela 1:

Tabela 1 – Análise granulométrica do material particulado

| Mesh/ Tyler | Abertura (mm) | Peso (g) |
|-------------|---------------|----------|
| +150        | 0,106         | 5,78     |
| -150 +170   | 0,090         | 2,73     |
| -170 +200   | 0,075         | 91,90    |
| -200 + 250  | 0,063         | 62,59    |
| Fundo       | 0             | 0        |
| Total       |               | 163      |

## 6- Resultados

Incorporar ao relatório a fundamentação teórica da fluidização, bem como da análise granulométrica, diâmetro médio de Sauter e classificação de Geldart. Ao tratamento de dados, discutir sobre a curva característica do leito, e as propriedades de suas partículas. Concluir sobre o tipo de fluidização observada e como a escolha do material, e do fluido de trabalho, impactariam na performance do leito.

## 7- Simbologia

|                    |                                                                            |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{A}rea$       | Área de seção transversal do leito, $[M^0L^2T^0]$                          |
| $D$                | Diâmetro da coluna, $[M^0L^1T^0]$                                          |
| $\bar{D}$          | Diâmetro médio de Sauter, $[M^0L^1T^0]$                                    |
| $D_i$              | Diâmetro médio de cada faixa de partículas, $[M^0L^1T^0]$                  |
| $d$                | Diâmetro médio das partículas, $[M^0L^1T^0]$                               |
| $H_{mf}$           | Altura do leito expandido, $[M^0L^1T^0]$                                   |
| $m_p$              | Massa de partículas contidas no leito, $[M^1L^0T^0]$                       |
| $q_{mf}$           | Velocidade superficial em condição de mínima fluidização, $[M^0L^1T^{-1}]$ |
| $-\Delta P_{mf}$   | Queda de pressão em condição de mínima fluidização, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$    |
| $\Delta x$         | Fração de massa das partículas com diâmetro menor que D, $[M^0L^0T^0]$     |
| $\varepsilon_{mf}$ | Fração de vazios em condição de mínima fluidização, $[M^0L^0T^0]$          |
| $\mu_f$            | Viscosidade do fluido, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$                                 |

|          |                                          |
|----------|------------------------------------------|
| $\phi$   | Esfericidade da partícula, $[M^0L^0T^0]$ |
| $\rho_f$ | Densidade do fluido, $[M^1L^{-3}T^0]$    |
| $\rho_s$ | Densidade da partícula, $[M^1L^{-3}T^0]$ |

## 8- Referências Bibliográficas

CARDOSO, C. R. **Arraste de partículas finas em um leito fluidizado e eficiência de coleta em um ciclone *dipleg***. Uberlândia, UFU, 2008.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 2012.

GREEN, D. W.; PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. Eighth Edition, 1934.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. Second Edition, 1923.

NITZ, M.; GUARDANI, R. **Fluidização gás-sólidos: fundamentos e avanços**. Revista Brasileira de Engenharia Química, 2008.

VISSOTTO, J. P. **Cogaseificação de serragem de *pinus* e lodo de esgoto em leito fluidizado**. Campinas, UNICAMP, 2013.