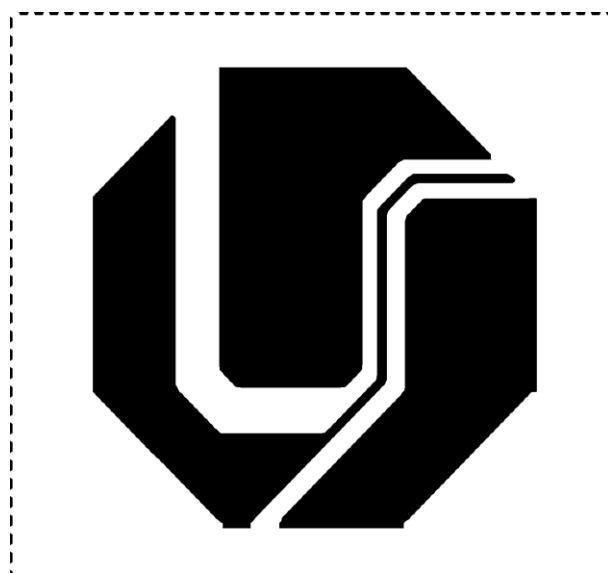


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Readequação da prática de laboratório de Engenharia Química 1: Leito
Fluidizado.

Autor: Pedro Wendel Sbrolini Borges

Uberlândia - MG

2017

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

Readequação da prática de laboratório de Engenharia Química 1: Leito
Fluidizado.

Autor: Pedro Wendel Sbrolini Borges

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

Uberlândia - MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
PROJETO DE GRADUAÇÃO DE PEDRO WENDEL SBROLINI BORGES
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 15 DE
DEZEMBRO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
Orientador- FEQUI/UFU

Suellen Mendonça Nascimento
FEQUI/UFU

Marcela Vieira Caixeta Machado
FEQUI/UFU

AGRADECIMENTO

À Deus por todas as oportunidades, força e fé que foi me dado aos longos desses anos.

Aos meus pais que mesmo eu estando longe de casa e perdendo alguns momentos de família me deram todo apoio para que eu pudesse seguir meu caminho.

Ao meu irmão que sempre segui como exemplo de dedicação e sucesso.

Aos todos meus amigos que conquistei e compartilharam das mesmas dificuldades e me apoiaram sempre.

Dias de Luta Dias de Glória

*“A vida me ensinou a nunca desistir
Nem ganhar, nem perder, mas procurar
evoluir*

*Podem me tirar tudo que tenho
Só não podem me tirar as coisas boas*

Que eu já fiz pra quem eu amo

E eu sou feliz e canto

O universo é uma canção

E eu vou que vou

História, nossas histórias

Dias de luta, dias de glória

Histórias, nossas histórias

Dias de luta, dias de glória”

Charlie Brow Jr.

Sumário

LISTA DE SÍMBOLOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Características das partículas	3
2.2 Regime de Fluidização	4
3 METODOLOGIA	7
3.1 Primeira adaptação	8
3.2 Segunda adaptação.....	10
3.3 Terceira adaptação.....	10
4 RESULTADOS	12
4.1 Análise granulométrica e cálculo do diâmetro médio	12
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	17
5.1 Conclusões.....	17
5.2 Sugestões	17
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
ANEXO I	19

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{D}$ – Diâmetro médio de Sauter [mm]

Δx – Fração de massa das partículas com diâmetro menor que D

D_i – Diâmetro médio de cada faixa [mm]

m_{H_2O} – Massa de água no picnômetro antes da adição do sólido [g]

m_{H_2O+pic} – Massa do picnômetro com água [g]

m_{pic} – Massa do picnômetro [g]

V_{H_2O} – Volume de água no picnômetro antes de adicionado o sólido [mL]

V_{pic} – Volume do picnômetro [mL]

$\rho_{H_2O}(T, P)$ – Densidade da água em função de Temperatura e Pressão [g/mL]

m_s – Massa do sólido [g]

m'_{H_2O} – Massa de água no picnômetro depois da adição do sólido [g]

$m_{pic+s+H_2O}$ – Massa do picnômetro com água e sólido [g]

V_s – Volume do sólido [mL]

V'_{H_2O} – Volume da água no picnômetro depois de adicionado o sólido [mL]

ρ_s – Densidade do sólido [g/mL]

ΔP_{mf} – Queda de Pressão no estado de mínima fluidização [kPa]

A – Área de seção transversal do leito [cm²]

L_{mf} – Altura das partículas no estado de mínima fluidização [cm]

ε_{mf} – Porosidade do leito no estado de mínima fluidização

ρ_g – Densidade do gás [g/cm³]

g – Aceleração da gravidade [m/s²]

m – Força dinâmica [N/m³]

μ - Viscosidade dinâmica [N.s/ m²]

k – Permeabilidade do meio poroso [m²]

q_{mf} – Velocidade de mínima fluidização [m/s]

Q – Vazão do fluido [m³/s]

$\overline{dp}$ – Diâmetro da partícula [mm]

$\emptyset$ - Esfericidade da partícula

RESUMO

O Leito fluidizado constitui de um fluido ascendendo por um leito de partículas, apresentando uma grande transferência de calor e de massa, utilizado muito nas indústrias farmacêuticas, indústrias de fertilizantes e em reatores químicos. Dado a grande importância do leito fluidizado e sua vasta aplicação, o presente trabalho busca readequar uma unidade prática para que o aluno realize os estudos sobre o tema, mostrando a análise a ser realizada um leito fluidizado. O objetivo inicial era montar uma curva de fluidização para um sistema de água e esferas de vidros. O seguinte trabalho mostrou que para este sistema o diâmetro médio de 0,848 mm para o leito 1 e 0,776 mm para o leito 2 nas esferas de vidro, o leito 1 apresentou uma perda de carga muito alta que não conduziu para a fluidização. Já para o leito 2 a coluna apresentava uma fluidização muito rápida e conduzia a um regime de bolhas no sistema. A seguir foi estudado o fluidização utilizando-se o ar como fluido, porém o mesmo também apresentou fluidização rápida e em regime de bolhas. Apresentou-se um novo objetivo para a prática, através do estudo de vários materiais, realizando o cálculo de suas respectivas densidades e diâmetro médio de Sauter, assim o aluno estudaria os diferentes regimes conduzidos na fluidização segundo o gráfico de Geldart (1996). Os objetivos não foram alcançados, pois a unidade necessitava de adequações, como a utilização de um regulador de pressão e materiais de diferentes diâmetros e densidades para análise. Assim após essas adaptações e sugestões dadas a unidade estaria pronta para ser utilizada.

Palavras-Chaves: Fluidização, Leito Fluidizado, Gráfico de Geldart.

ABSTRACT

The fluidized bed is a fluid rising by a bed of particles, showing a great transfer of heat and mass, used in the pharmaceutical industry, fertilizer industry and chemical reactors. Given the great importance of fluidized-bed and your wide application, this work seeks to readjust a practical unit for the student to perform studies on the topic, showing the analysis to be performed a fluidized bed. The initial goal was to mount a Fluidization curve for a water system and glass beads. The following work has shown that for this system the average diameter of 0.848 mm for 1 bed and 0.776 mm for bed 2 to glass spheres, the bed 1 presented a very high load loss that did not lead to the Fluidization. To the bed 2 the column featured a very fast Fluidization and drove to a regime of bubbles in the system. Next was studied the Fluidization using air as a fluid, but the same also introduced fast Fluidization and under bubbles. Presented a new goal to practice, through the study of various materials, performing the calculation of their respective densities and average diameter of Sauter, so the student would study the different schemes conducted in Fluidization second Geldart chart (1996). The goals were not achieved, as the unit will need of adjustments, such as the use of a pressure regulator and materials of different diameters and densities for analysis. So after these adjustments and suggestions the unit would be ready for use.

Keywords: Fluidization, Fluidization bed, Geldart's Chart

1 INTRODUÇÃO

O início da fluidização data de 1922, a fim de se produzir combustíveis líquidos a partir do gás de síntese, utilizando a gaseificação do carvão. Em 1940 engenheiros foram solicitados a desenvolver um processo de transformar querosene e óleos leves em gasolinas de alta octanagem para a aviação, dando-se então o processo Houdry de craqueamento com catalisador de alumina. A partir do processo Houdry foi desenvolvido o processo de craqueamento catalítico termofor (TCC) e aprimorado para o processo de craqueamento catalítico fracionado (FCC), onde se utiliza dois leitos fluidizados. O FCC gera produtos de petróleo mais leves como gasolina e outros intermediários que possuem valor agregado maior, através do processamento de frações intermediárias e pesadas, por reações químicas de quebra de moléculas através de catalisadores zeolíticos.

O leito fluidizado constitui de um de 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. A fluidização através de seu bom contato com as partículas sólidas conduz a uma diminuição da resistência do transporte de massa e calor, promovendo também uma boa mistura homogênea do material segundo NITZ e GUARDANI (2008).

A engenharia química apresenta diversas aplicações do processo da fluidização, podendo ser na indústria farmacêutica no qual “a técnica de revestir pílulas e comprimidos com soluções açucaradas tem sido um processo utilizado na Indústria Farmacêutica desde o século XVII, tendo apresentado uma evolução significativa a partir de 1950 quando foram introduzidos novos conceitos em equipamentos para recobrir e, nos anos 70, quando foi iniciado o recobrimento com materiais poliméricos, formadores de filme.” (DA SILVA, 2003).

Outra importante aplicação da fluidização é na secagem de alimentos, em que o alimento é depositado e o ar quente em alta atravessa o leito, devido a sua alta velocidade, fluidiza o alimento, fazendo a secagem ser mais rápida e homogênea. É comum para alimentos como: café, sal, farinha, carne em cubos entre outros (PRINCÍPIOS DE SECAGEM DE ALIMENTOS, 2010).

A utilização de reatores na engenharia química é também de fundamental importância e sendo uma das áreas mais importante de estudos, o reator de leito fluidizado é muito

presente na indústria química, pois pode ser usado em diversas reações químicas multifásicas. O material catalítico é o sólido a ser fluidizado e com a passagem do fluido a reação ocorre, em velocidades menores o sólido fica no leito, funcionando como um reator de leito fixo.

Em operações industriais, o leito fluidizado traz várias vantagens como: alta transferência de calor e massa entre o sólido e a partícula; permite o controle fácil de operação contínuas e automáticas, devido ao escoamento uniforme das partículas no leito; conduz a condição isotérmica no reator dado a mistura fácil dos sólidos e é adequada para operações em grandes escalas. Porém apresenta algumas desvantagens como: a rápida mistura dos sólidos apresentam tempos de residência não uniformes, reduzindo a desempenho e o rendimento; os sólidos frísáveis são pulverizados e arrastados pelo gás, tendo a necessidade de reciclá-los e causam erosão nos tubos e coluna devido à abrasão causada no arraste das partículas.

Este trabalho consiste em readequar uma unidade de leito fluidizado a ser ministrada na disciplina de Laboratório de Engenharia Química 1, a unidade se encontrava sem funcionamento e com diversos reparos a ser realizados. O aluno deverá ao realizar essa prática analisar diferentes materiais, quanto a sua densidade e granulometria e assim saber qual o regime os materiais irão apresentar e assim para o material de fluidização montar a curva característica de fluidização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características das partículas

De acordo com Geldart (1986) as partículas podem ser classificadas de acordo com a ρ_s , ρ_f e dp , em A, B, C e D, como mostra a Figura 2.1.

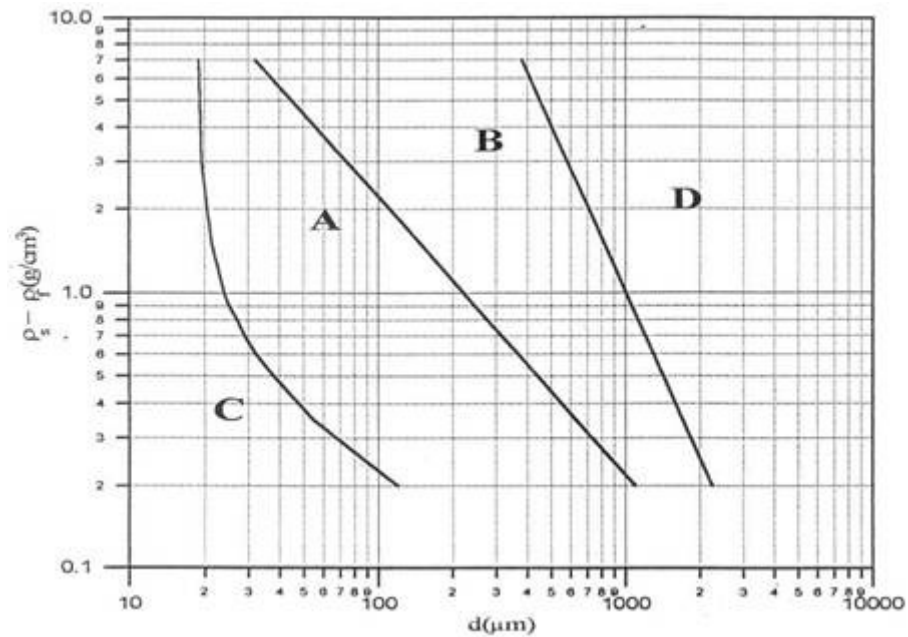


Figura 2.1 Gráfico de Geldart (Geldart, 1986)

Segundo Geldart (1986) apud Da Silva (2003), a região C é característica de partículas pequenas e com baixa densidade, como farinha de trigo e cimento e seu regime apresenta difícil fluidização com formações de canais e sem formação de bolhas e proporciona uma pobre mistura dos sólidos. A região A é a região de fluidização ideal, com uma distinção alta da velocidade de mínima fluidização, para a velocidade de início das bolhas, tendo como principal característica: alta expansão do leito e mistura dos sólidos. A região B é característica de formação de bolhas, apresentando uma moderada expansão do leito e mistura das partículas. A região D apresenta regime de leito de jorro, necessita de alta velocidade para fluidizar e possui baixa expansão de leito e de mistura de partículas.

Uma das variáveis mais importantes para a condução da fluidização é o diâmetro da partícula, que pode ser calculado através da análise de sua distribuição granulométrica segundo a equação 2.1, que mostra como calcular o diâmetro médio de Sauter das partículas:

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

Outra característica de grande importância é a densidade do sólido, esta pode ser calculada através da realização da picnometria, que se dá pelo seguinte método. Verifica-se a massa do picnômetro (m_{pic}), depois verifica a massa do picnômetro cheio com água (m_{pic+H_2O}), se obtém então a massa de água pela diferença entre as massa.

$$m_{H_2O} = m_{pic+H_2O} - m_{pic} \quad (2.2)$$

Através da massa de água, analisa a temperatura e pressão ambiente e pela equação de densidade descobre-se o volume da água que será o mesmo do picnômetro.

$$V_{H_2O} = V_{pic} = \rho_{H_2O}(T, P) \cdot m_s \quad (2.3)$$

Pesa-se então uma quantidade do sólido a ser analisado (m_s), coloque no picnômetro encha-o com água e pese o sistema ($m_{pic+s+H_2O}$), através da equação 2.4, obtém-se a nova massa de água.

$$m'_{H_2O} = m_{pic+s+H_2O} - m_{pic} - m_s \quad (2.4)$$

Da equação 2.5, verifica-se o novo volume de água (V'_{H_2O}), o volume do sólido se da pela diferença dos volumes de água.

$$V_s = V_{pic} - V'_{H_2O} \quad (2.5)$$

A densidade do sólido se dará pela razão entre a massa do sólido e seu volume, representada na equação 2.6, a seguir:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.6)$$

2.2 Regime de Fluidização

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 as Figuras 2.2 e 2.3.

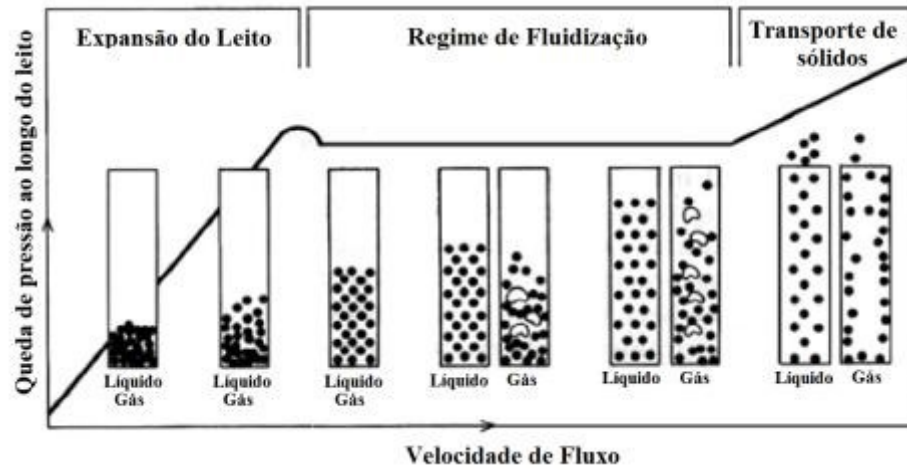


Figura 2.2 Curva de leito fluidizado mostrando os regimes do leito

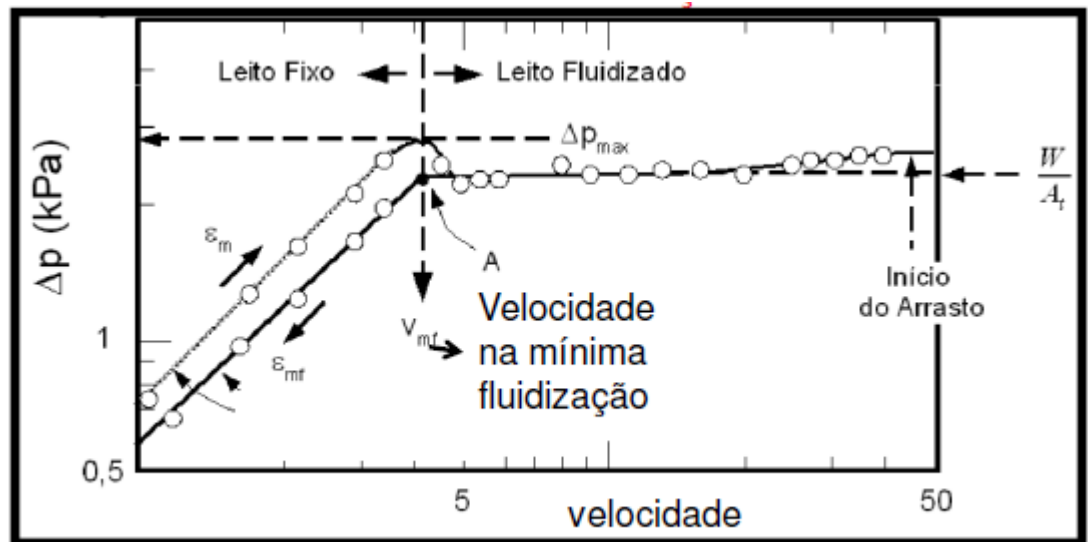


Figura 2.3 Curva característica de fluidização (Kunii e Levenspiel, 1991)

Segundo Da Silva (2003) através de um balanço da força de arraste em relação ao movimento ascendente do ar e das partículas, obtêm-se:

$$\Delta P_{mf} \cdot A = A \cdot L_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad (2.7)$$

Rearranjando a Equação 2.7, tem-se a equação para o cálculo da porosidade de mínima fluidização.

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\Delta P_{mf}}{L_{mf}(\rho_s - \rho_g)g} \quad (2.8)$$

Considerando que a queda de pressão é função da massa do sólido, da constante gravitacional e da área de seção transversal do leito, obtêm-se a seguinte relação:

$$\Delta P_{mf} = \frac{m_s g}{A} \quad (2.9)$$

Substituindo a Equação 2.9 na equação 2.8, chega-se a:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_s}{AL_{mf}(\rho_s - \rho_g)} \quad (2.10)$$

O escoamento em meios porosos mostra a seguinte equação:

$$\frac{-\Delta P_{mf}}{L_{mf}} = m \quad (2.11)$$

Através da relação de força de arraste e o peso aparente, pode-se escrever a força dinâmica pela seguinte Equação:

$$m = (\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (2.12)$$

A lei de Darcy resulta na seguinte equação:

$$m = \frac{\mu}{k} q_{mf} \quad (2.13)$$

A velocidade de mínima fluidização pode ser expressa como a razão entre a vazão e a área do leito, dada pela Equação 2.14:

$$q_{mf} = \frac{Q}{A} \quad (2.14)$$

Substituindo a Equação 2.14 na equação 2.13 e igualando a equação 2.11, teremos a seguinte relação para o valor de k:

$$k = \frac{\mu L_{mf}}{A(-\Delta P_{mf}/Q)} \quad (2.15)$$

A relação $-\Delta P_{mf}/Q$ se mostra como coeficiente angular da reta que caracteriza a região de leito fixo na curva de fluidização. Se igualarmos a equação 2.13 com a equação 2.12, e isolarmos a velocidade de mínima fluidização, terá a Equação 2.16, a seguir:

$$q_{mf} = \frac{k(\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g}{\mu} \quad (2.16)$$

Para partículas pequenas a Equação de Darcy, equação 2.17, mostra a seguinte relação para a velocidade de mínima fluidização, sendo $36\beta = 150$ para partículas esféricas e $36\beta = 180$ para partículas não esféricas:

$$q_{mf} = \frac{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3}{36\beta(1 - \varepsilon_{mf})} \frac{(\overline{dp})^2(\rho_s - \rho)g}{\mu} \quad (2.17)$$

Igualando a equação 2.16 à equação 2.17, teremos outra relação para k, dada na Equação 2.18, a seguir:

$$k = \frac{(\overline{dp}\phi)^2 \varepsilon_{mf}^3}{36\beta(1 - \varepsilon_{mf})^2} \quad (2.18)$$

3 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em readequar a prática de leito fluidizado da disciplina de LEQ, que não estava em uso. A aula prática à este tema se dá pela ascensão de um fluido em uma coluna que contém um material particulado, no qual o aluno deverá realizar o levantamento para cada medida de vazão, a altura do material e a queda de pressão correspondente, e montar um relatório com a curva de fluidização do leito e observando a área de regime de fluidização da curva.

Inicialmente, foi verificado o estado que se encontrava a unidade, segundo a Figura 3.1, encontrando seus primeiros pontos de melhoria.



Figura 3.1 Unidade Inicial da prática

A unidade constitui de dois leitos, chamados de leito 1 e leito 2, ambos apresentavam rotômetros, utilizados para medir a vazão da água. O rotômetro do leito 1 estava expresso em l/h e o do leito 2 em m³/h. Os dois leitos apresentavam em suas bases partículas maiores para a melhor dispersão do fluido antes de iniciar a ascensão da coluna. O leito 1 apresentava uma placa porosa, Figura 3.2, para sustentar o material a ser fluidizado e o leito 2 apresentava uma placa perfurada, figura 3.3, também utilizada para suportar o material.

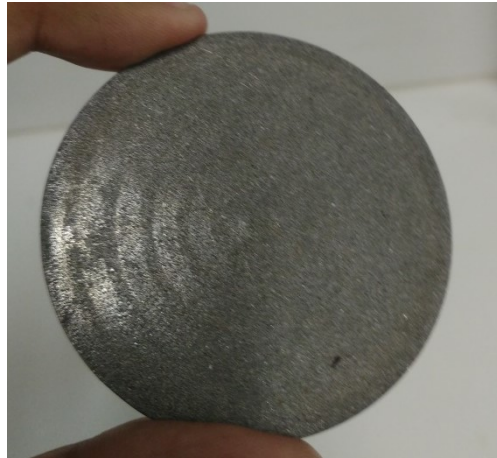


Figura 3.2 Placa porosa do leito 1

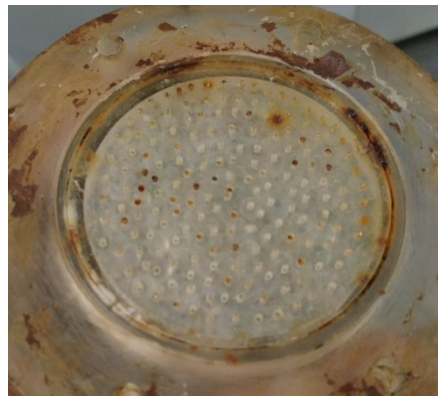


Figura 3.3 Placa perfurada do leito 2

3.1 Primeira adaptação

A unidade se encontrava sem bomba, e não apresentava mangueiras para ligar o leito à saída do reservatório. A unidade inicialmente era pra operada utilizando-se água como fluido e esferas de vidro como o material particulado. Foi colocada uma bomba centrífuga de 1/3 CV e as mangueiras e válvulas para operar os dois leitos independentes. Nas figuras 3.4 e 3.5 observa-se as primeiras adaptações para que a unidade pudesse operar.



Figura 3.4 Bomba instalada e válvulas para operação independente dos leitos



Figura 3.5 Mangueira que faltava para ligar a bomba ao Leito 1

3.2 Segunda adaptação

Após a primeira adaptação foi realizado um teste para observar o comportamento da unidade. Foi observado que as esferas de vidro estavam aglomeradas e estavam sendo arrastadas pela água, havia vazamentos em algumas partes das duas colunas, e também havia a necessidade de um *by-pass* para não forçar a bomba. Assim, as esferas de vidro foram lavadas e secadas em estufa e depois foi realizado o peneiramento para quebrar as esferas aglomeradas e realizar a distribuição granulométrica a fim de obter o diâmetro médio de partícula e os vazamentos foram vedados e o *by-pass* instalado.



Figura 3.6 *By-pass* instalado com retorno para o reservatório de água

3.3 Terceira adaptação

Para o levantamento da curva de fluidização é necessário fazer a medida da queda de pressão. Inicialmente esperava utilizar a medida através do *software* Labview, porém os dados obtidos não mostram condizentes, e os outros manômetros disponíveis também não se mostraram eficientes para realizar as medidas. O leito 1, que possuía a menor massa de esferas apresentou dificuldade de fluidização, mesmo com a válvula toda aberta e somente

este leito, observou-se grande perda de carga e não mostrou uma fluidização no leito devido a sua baixa vazão. O leito 2 apresentava entradas de bolhas de ar que se misturavam ao sistema, também fazendo com que a fluidização observada não fosse confiável. Assim a unidade foi testada para operar com ar comprimido, eliminando a utilização da bomba e tanque de armazenagem de água.

4 RESULTADOS

4.1 Análise granulométrica e cálculo do diâmetro médio

A unidade dispunha de duas colunas com quantidades diferentes de esferas de vidro em cada uma delas. Assim, foi realizado o peneiramento para a determinação do diâmetro médio de esferas em cada coluna. A Figura 4.1 representa as peneiras utilizadas, nas medidas 20, 28, 35 e 48 mesh, e a Figura 4.2 representa a distribuição granulométrica e o diâmetro médio de Sauter, Equação 2.1, para cada uma das colunas.



Figura 4.1 Peneiras utilizadas para a análise granulométrica das esferas de vidro

Leito 1					
Massa 204,39g					
Tyler	mm	Massa Peneira (g)	Massa com esferas (g)	Massa das Esferas (g)	ΔX
-14 +20	0,84	472,74	585,68	112,94	0,551949956
-20 +28	0,59	445,36	533,8	88,44	0,432215815
-28 +35	0,42	410,69	413,93	3,24	0,015834229
-35 +48	0,297	386,53	386,53	0	0
Fundo	0	417,08	417,08	0	0
Total		2132,4	2337,02	204,62	1
Diâmetro Médio	0,848				

Leito 2					
Massa 204,39g					
Tyler	mm	Massa Peneira (g)	Massa com esferas (g)	Massa das Esferas (g)	ΔX
-14 +20	0,84	472,76	610,76	138	0,311491321
-20 +28	0,59	445,36	736,56	291,2	0,657291831
-28 +35	0,42	410,7	424,11	13,41	0,030268831
-35 +48	0,297	386,54	386,96	0,42	0,000948017
Fundo	0	417,09	417,09	0	0
Total		2132,45	2575,48	443,03	1
Diâmetro Médio	0,776				

Figura 4.2 Análise granulométrica realizada para as esferas de vidro de cada leito

Os problemas apresentados pela unidade, mesmo após os reparos realizados, mostraram que, utilizando a água como fluido e as esferas de vidro, o aluno ao realizar a prática não iria obter uma curva característica de fluidização, pois para o leito 1, devido à sua perda de carga não era possível verificar uma alteração na altura do leito e em sua vazão. Já no leito 2 a entrada de ar no sistema não permitia uma análise confiável.

Considerando a massa específica das esferas de vidros como $2,23 \text{ g/cm}^3$ e seu diâmetro sendo $0,848 \text{ mm}$, a massa específica da água 1 g/cm^3 . Ao fazer a comparação de água e esferas de vidro no gráfico de Geldart, notou-se que este sistema se encontrava na região B, característica de leito borbulhante, como mostra a Figura 4.3.

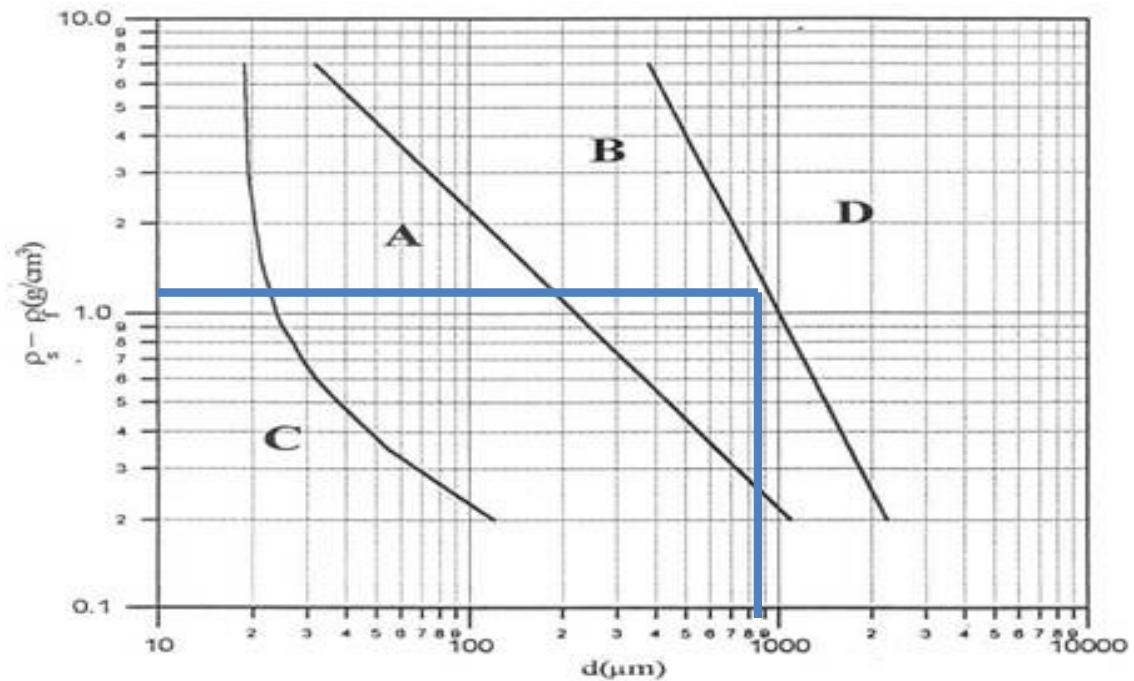


Figura 4.3 Região de Geldart (1986) para o sistema água e esferas de vidro

A melhor adaptação encontrada foi trocar a água por ar comprimido, como fluido do leito. Na análise do Geldart, para as esferas de vidro, este sistema se encontrava na região D, característica de formação de jorro, como mostra a Figura 4.4. Sendo assim foram estudados outros materiais para poder substituir as esferas de vidro. Para a análise do gráfico de Geldart, Figura 2.1, devido a densidade do ar ser muito inferior ao do sólido, esta é desconsiderada. Assim em substituição das esferas de vidro, foram realizados teste com quartzito e com esferas de sílica azul de diâmetro médio de 3 mm e densidade de 0,7 g/cm³. O quartzito apresentou formações de canais, característico da região C e a sílica apresentou um regime de bolhas com baixa fluidização, característica da região B, como mostra a figura 4.5.

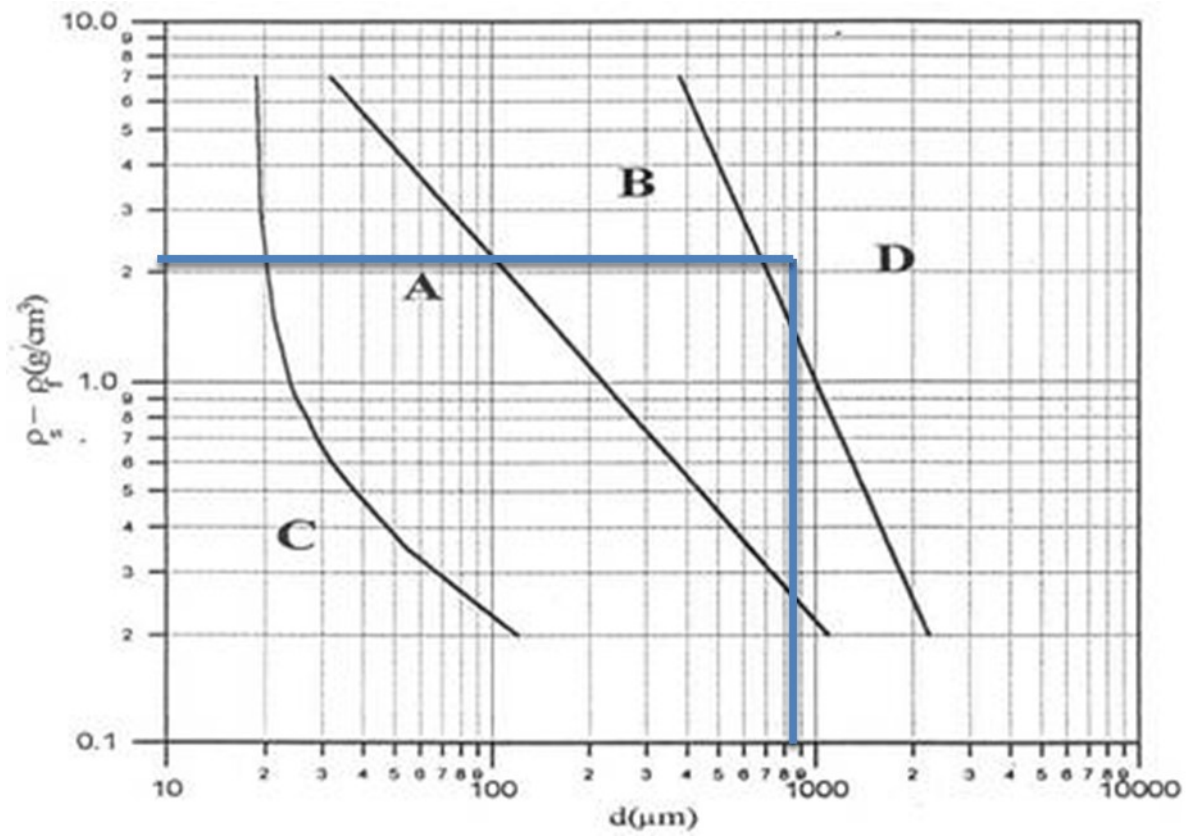


Figura 4.4 Região de Geldart (1986) para o sistema ar e esferas de vidro

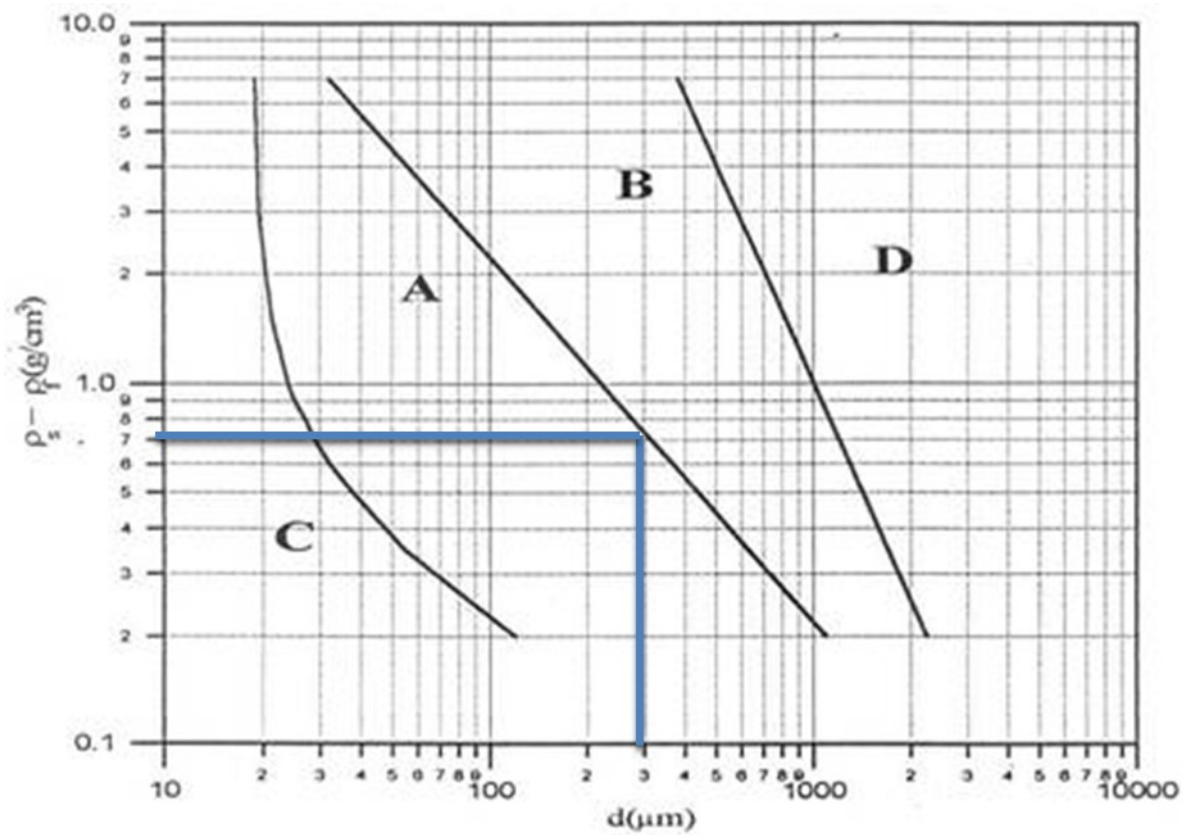


Figura 4.5 Região de Geldart (1986) para o sistema ar e sílica azul

Ao analisar diferentes materiais para encontrar um que se adeque a região A do gráfico de Geldart, que caracteriza região ideal para fluidização, tem-se uma mudança no objetivo da prática inicial de se estudar a curva de fluidização ideal. O novo objetivo consiste em realizar, para diferentes materiais particulados, a análise de sua densidade, através da picnometria, analisar o seu diâmetro médio de Sauter, e realizar a granulométrica com a prática de peneiramento. O aluno, que for operar a unidade, com os dados levantados para cada material e utilizando do gráfico de Geldart, saberá identificar qual regime ele se encontrará no leito ao se aplicar a fluidização através do ar, utilizando um regulador de pressão para que a vazão do ar não sofra alteração involuntária durante o experimento.

Através da fluidização de diferentes materiais o aluno será capaz de visualizar os diferentes tipos de fluidização representado por Geldart e também deverá montar a curva de fluidização com a vazão crescente e depois decrescente para o sistema que apresente fluidização ideal. No Anexo I segue modelo do roteiro da prática readequada neste trabalho a ser aplicado pelo aluno.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O presente trabalho consistiu na readequação da prática de leito fluidização a ser aplicada na disciplina de Laboratório de Engenharia Química 1, inicialmente a prática iria ser realizada com a montagem de uma curva característica de fluidização, onde o aluno de graduação pudesse analisar a região de leito fixo e a altura de mínima fluidização, para um sistema que constituía de dois leitos recheados: um com esferas de vidro de diâmetro de 0,848 mm e outro recheado com esferas de vidros de diâmetro 0,776 mm, sendo fluidizados com água. Após as adequações, ao realizar teste, não foi observado o comportamento esperado. Foram realizadas análises de outros materiais como o quartzito e sílica azul, verificando seu comportamento no gráfico de Geldart (1996) e observando esse comportamento no leito. O objetivo da prática se dará pelo estudo de outros materiais, verificando sua densidade através do método de picnometria, e seu diâmetro médio de Sauter realizando o peneiramento dos materiais. Assim o aluno irá analisar no gráfico de Geldart (1996) o comportamento de fluidização e para diferentes tipos de materiais. Assim o material que apresentar fluidização ideal o aluno deverá levantar a sua curva de fluidização.

5.2 Sugestões

A sílica utilizada apresenta diâmetro entre 2 e 4 mm, assim poderá realizar seu peneiramento e separar os diâmetros para que ela apresente um diâmetro médio de 2 mm. Isto porque devido à sua baixa densidade e esse menor diâmetro, a sílica azul se enquadraria na região A de Geldart, caracterizando fluidização ideal. Assim o aluno poderá fazer o levantamento da curva característica para este material. Outra sugestão seria de se realizar o peneiramento e picnometria do quartzito pra verificar seus parâmetros reais e confirmar que seu comportamento é característico da região C, que forma canais no leito.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CELESTINO, S. M. C. Princípios de Secagem de Alimentos, 1ª e.d Platina, DF, Embrapa Cerrados, 2010. 49 p.
- Como funciona um reator de leito fluidizado | CIMM | CIMM. Cimm.com.br. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7812-como-funciona-um-reator-de-leito-fluidizado>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- DA SILVA, O. S., Desenvolvimento do processo de recobrimento e secagem de microgânulos em leito fluidizado, Campinas, UNICAMP, 2003. 165 p.
- ESFERAS EM VIDRO BOROSSILICATO - RGP. Rgpballs.com. Disponível em: <<http://www.rgpballs.com/pt/products/ESFERAS/ESCOLHA-R%C3%81PIDA/VIDRO/esferas-em-vidro-borossilicato>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- LAPROM – Tecnologia da Fluidização. Fluidizacao.com.br. Disponível em: <<http://www.fluidizacao.com.br/>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- NITZ, M.; GUARDANI, R. Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços, Revista Brasileira de Engenharia Química, 13 p, Dezembro. 2008.
- SHAUL, S.; RABINOVICH, E.; KALMAN, H., Typical Fluidization Characteristics for Geldart's Classification Groups, 2014.
- VIEGAS, M. C., Desenvolvimento de um reator de bancada de leito fluidizado para a produção de etanol utilizando linhagens de leveduras flocculantes, Campinas, UNICAMP, 1999. 99 p.
- YANG, W.C et. Al Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A, Siemens Westinghouse Power Corporation, MARCEL DEKKER, INC, 851 p.

ANEXO I

ROTEIRO – PRÁTICA DE LEITO FLUIDIZADO

1. Objetivo

Determinar a densidade e diâmetro médio de Sauter, para diferentes materiais e analisar o seu comportamento de fluidização no gráfico de Geldart. Observar o comportamento na unidade de leito fluidizado e montar a curva característica de fluidização para o material que apresentar fluidização ideal.

2. Fundamentação Teórica

Em operações industriais o leito fluidizado traz várias vantagens como: alta transferência de calor e massa entre o sólido e a partícula; permite o controle fácil de operação contínuas e automáticas, devido ao escoamento uniforme das partículas no leito; conduz a condição isotérmica no reator dado a mistura fácil dos sólidos e é adequada para operações em grandes escalas. Porém apresenta algumas desvantagens como: a rápida mistura dos sólidos apresentam tempos de residência não uniformes, reduzindo a desempenho e o rendimento; os sólidos frísáveis são pulverizados e arrastados pelo gás, tendo a necessidade de reciclá-los e causam erosão nos tubos e coluna devido à abrasão causada no arraste das partículas.

Ocorre a classificação das partículas em quatro regiões, C, A, B, D, dadas pela relação de densidade do sólido, densidade do fluido e o diâmetro das partículas do sólido segundo GELDART (1986), representado na figura 1.

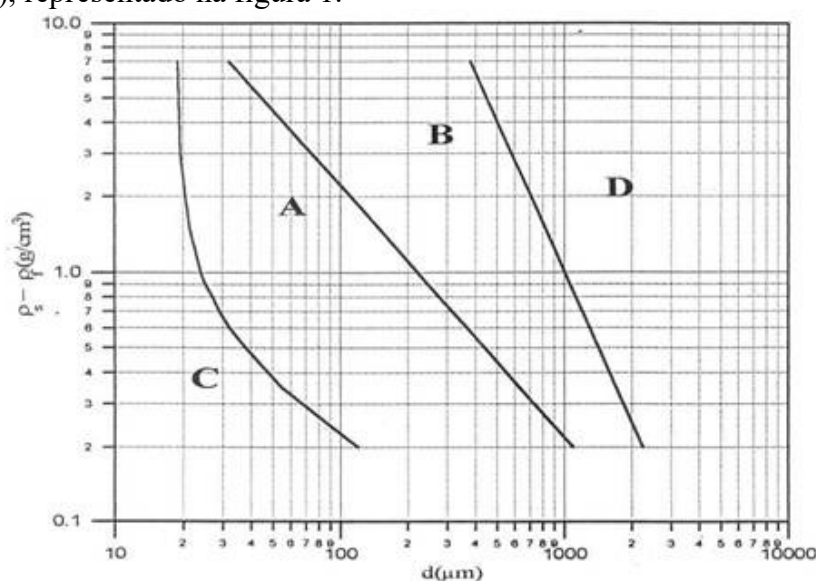


Figura 1 Gráfico de Geldart (Geldart, 1986)

Uma das variáveis mais importantes para a condução da fluidização é o diâmetro da partícula, que pode ser obtido pela análise granulométrica, outra característica de grande

importância é a densidade do sólido, esta pode ser calculada através da realização da picnometria.

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 as figuras 2.

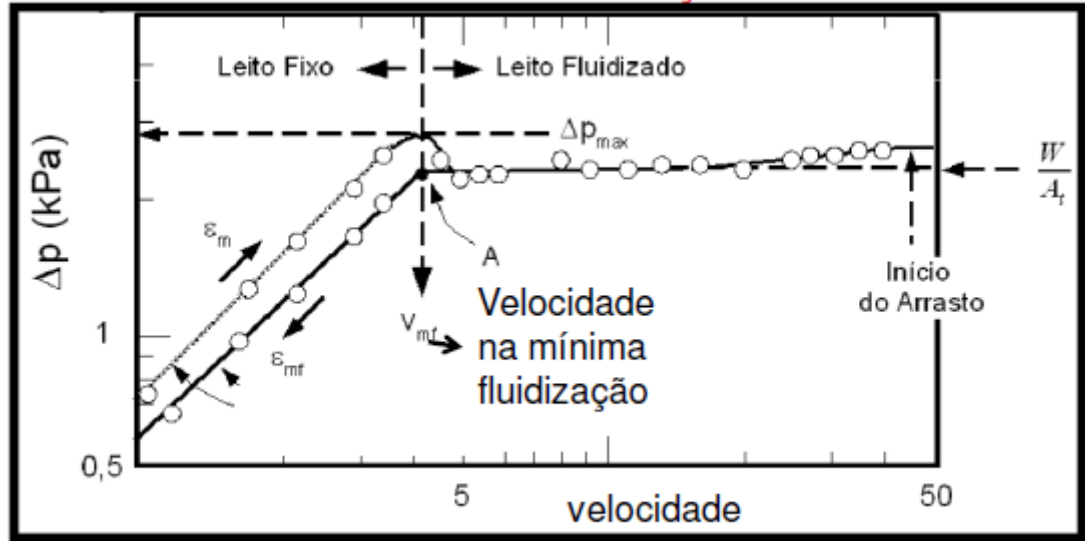


Figura 2 Curva Característica de Fluidização (Kunii e Levenspiel, 1991)

Segundo DA SILVA (2003) através de um balanço da força de arraste em relação ao movimento ascendente do ar e das partículas, obtêm-se:

[queda de pressão no Leito].[área da seção transversal do leito]=[volume do leito].[fração de sólidos].[peso específico dos sólidos]

$$\Delta P_{mf} \cdot A = A \cdot L_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad (1)$$

Rearranjando a equação 1, tem-se a equação para o cálculo da porosidade de mínima fluidização.

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\Delta P_{mf}}{L_{mf}(\rho_s - \rho_g)g} \quad (2)$$

Considerando que a queda de pressão é em função da massa do sólido, da constante gravitacional e da área de seção transversal do leito, obtêm-se a seguinte relação:

$$\Delta P_{mf} = \frac{m_s g}{A} \quad (3)$$

Substituindo a equação 3 na equação 2, chega-se a:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_s}{A L_{mf}(\rho_s - \rho_g)} \quad (4)$$

O escoamento em meios porosos mostra a seguinte equação:

$$\frac{-\Delta P_{mf}}{L_{mf}} = m \quad (5)$$

Através da relação de força de arraste e o peso aparente, pode-se escrever a força dinâmica pela seguinte equação:

$$m = (\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (6)$$

A lei de Darcy nos trás a seguinte equação:

$$m = \frac{\mu}{k} q_{mf} \quad (7)$$

A velocidade de mínima fluidização pode ser expressa como a razão entre a vazão e a área do leito, dada pela equação 8:

$$q_{mf} = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

Substituindo a equação 8 na equação 7 e igualando a equação 5, teremos a seguinte relação para o valor de k:

$$k = \frac{\mu L_{mf}}{A(-\Delta P_{mf}/Q)} \quad (9)$$

A relação $-\Delta P_{mf}/Q$ se mostra como coeficiente angular da reta que caracteriza a região de leito fixo na curva de fluidização. Se igualarmos a equação 6 com a equação 7, e isolarmos a velocidade de mínima fluidização, terá a equação 10, a seguir:

$$q_{mf} = \frac{k(\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g}{\mu} \quad (10)$$

Para partículas pequenas a Equação de Darcy, equação 11, mostra a seguinte relação para a velocidade de mínima fluidização, sendo $36\beta = 150$ para partículas esféricas e $36\beta = 180$ para partículas não esféricas:

$$q_{mf} = \frac{\emptyset^2 \varepsilon_{mf}^3}{36\beta(1 - \varepsilon_{mf})} \frac{(\overline{dp})^2(\rho_s - \rho)g}{\mu} \quad (11)$$

Igualando a equação 10 à equação 11, teremos outra relação para k, dada na equação 12, a seguir:

$$k = \frac{(\overline{dp}\emptyset)^2 \varepsilon_{mf}^3}{36\beta(1 - \varepsilon_{mf})^2} \quad (12)$$

3. Materiais e Métodos

- Unidade com dois leitos de diâmetros **D**, com marcador de altura e rotâmetro.
- Materiais particulados (esferas de vidro, quartzito e sílica azul).
- Regulador de pressão.
- Ar comprimido.

- Picnômetro.
- Balança.
- Peneiras.
- Base vibratória para peneiras.

Para a análise da densidade de cada material, será utilizado o método de picnometria que se dá pelo seguinte método. Verifica-se a massa do picnômetro (m_{pic}), depois verifica a massa do picnômetro cheio com água (m_{pic+H_2O}), se obtém então a massa de água pela diferença entre as massa.

$$m_{H_2O} = m_{pic+H_2O} - m_{pic} \quad (13)$$

Através da massa de água, analisa a temperatura e pressão ambiente e pela equação de densidade descobre-se o volume da água que será o mesmo do picnômetro.

$$V_{H_2O} = V_{pic} = \rho_{H_2O}(T, P) \cdot m_s \quad (14)$$

Pesa-se então uma quantidade do sólido a ser analisado (m_s), coloque no picnômetro encha-o com água e pese o sistema ($m_{pic+s+H_2O}$), através da equação 15, obtém-se a nova massa de água.

$$m'_{H_2O} = m_{pic+s+H_2O} - m_{pic} - m_s \quad (15)$$

Da equação 15, verifica-se o novo volume de água (V'_{H_2O}), o volume do sólido se da pela diferença dos volumes de água.

$$V_s = V_{pic} - V'_{H_2O} \quad (16)$$

A densidade do sólido se dará pela razão entre a massa do sólido e seu volume, representada na equação 17, a seguir:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (17)$$

Após o cálculo da densidade, ira realizar o peneiramento dos materiais a fim de se obter o diâmetro médio de Sauter. Pesa-se cada peneira vazia, depois se pesa o material, coloque as peneiras de modo da maior abertura estar em cima das menores, coloque sobre o equipamento vibratório durante 10 minutos, depois pese as peneiras para obter a massa retida em cada abertura e assim realizar a análise granulométrica que pode ser calculado segundo a equação 18, que mostra como calcular o diâmetro médio de Sauter das partículas:

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum \frac{(\Delta X)_i}{D_i}} \quad (18)$$

4. Tratamentos de dados

Com os dados de densidade e diâmetro médio, verificar no gráfico de Geldart em qual região estará o material, e analisar se o comportamento observado no leito segue o visto no gráfico.

O relatório deverá conter o gráfico referente à curva característica de queda de pressão versus vazão de ar da fluidização ideal da “ida” e da “volta”, para o material que apresentar fluidização ideal, segundo a análise do gráfico de Geldart (1986). As curvas devem ser plotadas em um mesmo gráfico, conforme mostra a Figura 2. A figura deve conter a indicação da condição de altura mínima de fluidização experimental, que é determinada visualmente. As correlações descritas na equação 9 devem ser usadas para a condição do leito estudado e seus valores confrontados com aquele obtido na equação 12. O desvio entre o valor experimental e aquele obtido por cada uma das equações deve ser calculado, listando a ordem crescente de desvios obtidos.

Os gráficos devem ser gerados em software próprio e exclusivo para essa finalidade (Exemplo: Grapher, Origin, etc.).

5. Simbologia

$\bar{D}$ – Diâmetro médio de Sauter [mm]

Δx – Fração de massa das partículas com diâmetro menor que D

D_i – Diâmetro médio de cada faixa [mm]

m_{H_2O} – Massa de água no picnômetro antes da adição do sólido [g]

m_{H_2O+pic} – Massa do picnômetro com água [g]

m_{pic} – Massa do picnômetro [g]

V_{H_2O} – Volume de água no picnômetro antes de adicionado o sólido [mL]

V_{pic} – Volume do picnômetro [mL]

$\rho_{H_2O}(T, P)$ – Densidade da água em função de Temperatura e Pressão [g/mL]

m_s – Massa do sólido [g]

m'_{H_2O} – Massa de água no picnômetro depois da adição do sólido [g]

$m_{pic+s+H_2O}$ – Massa do picnômetro com água e sólido [g]

V_s – Volume do sólido [mL]

V'_{H_2O} – Volume da água no picnômetro depois de adicionado o sólido [mL]

ρ_s – Densidade do sólido [g/mL]

ΔP_{mf} – Queda de Pressão no estado de mínima fluidização [kPa]

A – Área de seção transversal do leito [cm²]

L_{mf} – Altura das partículas no estado de mínima fluidização [cm]

ε_{mf} – Porosidade do leito no estado de mínima fluidização

ρ_g – Densidade do gás [g/cm³]

g – Aceleração da gravidade [m/s²]

m – Força dinâmica [N/m³]

μ - Viscosidade dinâmica [N.s/ m²]
 k – Permeabilidade do meio poroso [m²]
 q_{mf} – Velocidade de mínima fluidização [m/s]
 Q – Vazão do fluido [m³/s]
 $\overline{dp}$ – Diâmetro da partícula [mm]
 $\emptyset$ - Esfericidade da partícula

6. Referências Bibliográficas

- CELESTINO, S. M. C. Princípios de Secagem de Alimentos, 1ª e.d Platina, DF, Embrapa Cerrados, 2010. 49 p.
- Como funciona um reator de leito fluidizado | CIMM | CIMM. Cimm.com.br. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7812-como-funciona-um-reator-de-leito-fluidizado>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- DA SILVA, O. S., Desenvolvimento do processo de recobrimento e secagem de microgânulos em leito fluidizado, Campinas, UNICAMP, 2003. 165 p.
- LAPROM – Tecnologia da Fluidização. Fluidizacao.com.br. Disponível em: <<http://www.fluidizacao.com.br/>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- NITZ, M.; GUARDANI, R. Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços, Revista Brasileira de Engenharia Química, 13 p, Dezembro. 2008.
- SHAUL, S.; RABINOVICH, E.; KALMAN, H., Typical Fluidization Characteristics for Geldart's Classification Groups, 2014.
- VIEGAS, M. C., Desenvolvimento de um reator de bancada de leito fluidizado para a produção de etanol utilizando linhagens de leveduras flocculantes, Campinas, UNICAMP, 1999. 99 p.
- YANG, W.C et. Al Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A, Siemens Westinghouse Power Corporation, MARCEL DEKKER, INC, 851 p.