



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

HEVAIR CASTRO SILVA

**DETERMINAÇÃO DE CORRELAÇÃO EMPÍRICA PARA PREDIÇÃO DE PERDA
DE CARGA EM MÓDULO DE LEITO FLUIDIZADO**

JOÃO PESSOA/PB
2019

HEVAIR CASTRO SILVA

**DETERMINAÇÃO DE CORRELAÇÃO EMPÍRICA PARA PREDIÇÃO DE PERDA
DE CARGA EM MÓDULO DE LEITO FLUIDIZADO**

Trabalho Final do Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química, na Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.
Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ismael Curbelo Garnica

JOÃO PESSOA/PB
2019

S586d Silva, Hevair Castro.

DETERMINAÇÃO DE CORRELAÇÃO EMPÍRICA PARA
PREDIÇÃO DE PERDA DE CARGA EM MÓDULO DE LEITO
FLUIDIZADO / Hevair Castro Silva. - João Pessoa, 2019.

43 f.

Orientação: Alfredo Ismael Curbelo Garnica. Monografia
(Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. leito fluidizado. 2. perda de carga. 3. aulas experimentais. I. Garnica,
Alfredo Ismael Curbelo. II. Título.

UFPB/BC

HEVAIR CASTRO SILVA

**DETERMINAÇÃO DE CORRELAÇÃO EMPÍRICA PARA PREDIÇÃO DE PERDA
DE CARGA EM MÓDULO DE LEITO FLUIDIZADO**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química, na Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

João Pessoa, 30 de abril de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alfredo Ismael Curbelo Garnica

Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi

Gustavo dos Santos Lopes

JOÃO PESSOA/PB
2019

DEDICATÓRIA

À minha Mãe (*in memorium*) e à minha família
pelas vidas dedicadas à minha educação e
formação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela minha vida e de todos que se fizeram presentes nela até hoje.

À minha mãe amada, o meu singelo obrigado, Maria Helena (*in memoriam*).

Aos meus irmãos, Monique, Vinicius, e suas famílias que tive o privilégio de conhecê-los durante essa longa jornada na universidade, e em especial, a Henrique, pela atenção fraterna e carinho infinito, na sua forma de fazê-lo.

Meus amados pequenos, Eduardo, Nicolas e Gabriel, que são parte inspiradora na minha busca por algo maior.

Meus novos afilhados, Ygor e Yago, que assim como os outros pequenos, também representam fontes de forças internas desconhecidas até mesmo por mim.

Aos meus tios maternos, e suas famílias por todo carinho, apoio e amor meus infinitos agradecimentos: Papai Zé Milton (*in memoriam*), Tio Elio, Tio Beca, Tio Chico, e em especial Tio Paulo, vocês todos são exemplos que carregarei para sempre comigo na minha essência.

Aos tios que entraram na minha família, Cremilda, Simone, em especial Nilton e Tia Caca, pela cumplicidade verdadeira e por se fazerem tão presente em minha vida.

Aos meus primos pelos momentos de alegrias e confusões compartilhados até nos dias de hoje, especialmente, João Pedro e Valéria, vocês são parte fundamental no amor que eu desenvolvo diariamente por nossa família. Vocês são LUZ.

Aos meus familiares que me energizam com a luz fraterna.

À toda minha família paterna pelos momentos compartilhados e pela esperança devotada sobre mim, em especial, Vó Nazaré, Tia Inêz, meus primos Alexandre, Andreza, Gustavo, Maria Julia, Rodrigo, e ao meu Pai, Ivan Antônio (*in memoriam*).

Às referências de mulher de garra, perseverança e Fé, minha base, meu tudo, minha Vó Helena, minha Mainha, Elaene Regina e minha Tia Lucilene, pela luta pertinaz e doação incondicional.

Ao meu saudoso Vô Dandão, exemplo de serenidade, um homem muito virtuoso.

Ao meu orientador Alfredo Curbelo, pela mentoria e pelo exemplo e por me dar esperança de encontrar mais professores movidos por replicar seus conhecimentos contribuindo para um mundo mais igualitário e justo.

Àqueles que se fizeram presente na minha vida durante minha graduação, em especial, Ayane, Drielly, Monica, Amanda, Madu, Gustavo, Matheus, minha família PROJEQ, e muitos outros.

Aos tantos amigos e professores com os quais me relacionei durante a graduação e que muito me ensinaram.

A todos, minha humilde gratidão.

RESUMO

Devido à larga aplicação e vantagens dos fenômenos de escoamento em meios porosos em equipamentos industriais, o conhecimento e controle do processo têm grande relevância no âmbito da Engenharia Química. A perda de carga é o principal fator de custos em processos industriais com leito fluidizado representando, portanto, um tópico essencial na formação do profissional engenheiro. Este estudo tem como objetivo determinar a perda de carga em leito fluidizado no módulo de aulas práticas do Laboratório de Operações Unitárias da UFPB através de dados experimentais e equações teóricas, estabelecendo uma equação matemática que prediz a perda de carga em função do fluxo volumétrico aplicado. Para tanto foram estudados parâmetros de caracterização do leito, da coluna, das partículas e dos fluidos aplicados nos experimentos. Os resultados de perda de carga obtidos com base na Equação de Ergun, se mostraram satisfatórias na determinação teórica dos parâmetros. Com base nos dados experimentais foi determinada uma equação polinomial para predizer os valores de perda de carga em função dos fluxos volumétricos, que apesar de apresentar certa disparidade de variação percentual entre o teórico e o experimental, o comportamento gráfico se mostrou similar. Desta forma, a equação poderá auxiliar de forma assertiva os alunos usuários do módulo em experimentos futuros na determinação da perda de carga do módulo estudado.

Palavras chaves: Leito fluidizado, perda de carga, aulas experimentais.

ABSTRACT

Due to the wide application and advantages of the phenomena of flow through porous media in industrial equipments, the acquaintance and control of the process have great relevance in the scope of Chemical Engineering. Head loss is the main cost factor in fluidized bed industrial processes, thus representing an essential topic for the formation of the professional engineer. This study aims to determine the fixed bed head loss in practical classes' module in the Laboratory Unitary Operations at the UFPB by experimental data and theoretical equations, establishing a mathematical equation which predicts the head loss as a function of the applied volumetric flow. For this, parameters of bed, column, particle and fluid characterization were studied. The head loss results were obtained based on Ergun's equations, were satisfactory in the theoretical determination of the parameters. Based on the experimental data, a polynomial equation was determined to predict the values of loss of charge as a function of the volumetric flows, which, despite a certain percentage variation between theoretical and experimental, showed a similar graphical behavior. In this way, the equation may assertively assist the student to determine the head loss in the studied module in future experiments.

Key words: Fluidized bed, head loss, practical classes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO.....	3
2.1	Objetivo Geral.....	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1	Escoamento em meios porosos	4
3.2	Regimes Fluidodinâmicos.....	5
3.3	Propriedades fluidodinâmicas do leito fluidizado.....	8
3.3.1	Velocidade Mínima de Fluidização (U_{mf}).....	8
3.3.2	Velocidade terminal (U_t) de partículas.....	10
3.4	Tipos de Recheio.....	11
3.4.1	Propriedades dos Recheios.....	11
3.5	Perda de Carga	14
4	METODOLOGIA	15
4.1	Materiais e Método	15
4.1.1	Porosidade	16
4.1.2	Perda de Carga	16
4.2	Descrição Experimental	17
4.2.1	Ensaio da porosidade do leito fixo	17
4.2.2	Ensaio de perda de carga.....	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5.1	Propriedades do Sistema de Escoamento.....	19
5.1.1	Caracterização das partículas	19
5.1.2	Caracterização da coluna.....	19
5.1.3	Caracterização dos fluidos	20

5.1.4	Caracterização do leito	20
5.2	Escoamento em leito fluidizado	21
5.2.1	Determinação do Fluxo volumétrico.....	21
5.2.2	Determinação da Pressão manométrica	22
5.2.3	Determinação da U_{mf} pelo método da Queda de Pressão	23
5.2.4	Verificação de ocorrência de histerese.....	23
5.2.5	Determinação da expansão do leito.....	24
5.3	Determinação da perda de carga	25
5.3.1	Determinação da perda de carga experimental	25
5.3.2	Determinação da perda de carga empírica	25
5.3.3	Comparação dos métodos de determinação da perda de carga	26
5.4	Equação empírica para perda de carga.....	27
6	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

Na indústria química encontramos uma série de processos com operações unitárias onde o fluido passa por um leito particulado que pode ser, por exemplo, cascalho, areia, materiais adsorventes, catalisadores ou corpos de recheio na retificação (ISENMANN, 2012).

São incontáveis as aplicações do leito fluidizado na indústria, seja ela do segmento químico, alimentício e até mesmo farmacêutico. Kunii e Levenspiel (1991) descrevem a maioria das aplicações desse equipamento, que pode ser usado como secador, gaseificador, combustor, trocador de calor, entre outras operações.

A forma singular de contato entre as fases envolvidas (sólidos e gases ou líquidos), faz do leito fluidizado uma das configurações de leitos de partículas móveis mais eficaz e relativamente barata dentre as existentes (KUNII e LEVENSPIEL, 1991), sobretudo em razão da eficiente mistura proporcionada, o que garante ao processo altas taxas de transferência de calor e de massa, ao mesmo em que apresentam baixas quedas de pressão (GELDART, 1986).

Um meio poroso é uma fase sólida contínua que contém muitos espaços vazios, ou poros, em seu interior. Ao atravessar um meio poroso o fluido o faz através dos vazios existentes entre as partículas. As dimensões dos espaços vazios, ou poros, seguidos pelos fluidos em escoamentos dependem de fatores variáveis entre os quais: tamanho da partícula, sua esfericidade ou forma geométrica e da rugosidade de sua superfície (FRANCIS, 1980).

No entanto, arranjos de escoamentos através de meios porosos carregam consigo as dificuldades associadas aos problemas de: abrasão, decorrente da interação do material sólido com os internos do leito; arraste, e eventual perda de material mais fino do processo, necessitando de equipamentos para retenção do particulado como ciclones, filtros e outros; e a perda de carga, ocasionando elevado consumo de energia para transporte do fluido (YANG, 2003).

A perda de energia no sistema é um resultado inevitável que ocorre em infinitos processos, e, por isso, é norteadora de muitos estudos que visam comprimir tal efeito. A investigação da influência da perda de carga, e seus impactos na operação dos equipamentos, pode ser auxiliada através de modelos matemáticos baseados na interação do fluido e do meio. Nos processos de escoamento em meios porosos, as equações de Darcy e de Ergun tomam espaço para descrever a fluidodinâmica do processo, e colaboram com a previsão de perda de carga na engenharia de fluidização.

Diante do exposto, este trabalho propõe o estudo do leito de tipo fluidizado do módulo de aulas práticas do laboratório de operações unitárias do curso de engenharia química da UFPB com o intuito de estabelecer uma correlação empírica baseada no fluxo volumétrico do fluido para a determinação da perda de carga do meio, e confrontar os resultados com os calculados por equações teóricas.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Determinar um modelo matemático empírico capaz de prever a queda de pressão de um módulo de leito fluidizado em função de uma faixa de fluxo volumétrica aplicada.

2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho possui como objetivos específicos:

- Determinar a porosidade das partículas do recheio do leito fluidizado utilizado;
- Desenvolver uma equação empírica que relacione vazão do fluido e a perda de carga;
- Analisar a similaridade dos resultados encontrados através de modelo teórico e empírico frente aos obtidos experimentalmente.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fluidização é uma operação unitária que envolve a interação de um fluido, líquido ou gasoso, que escoar por um meio sólido, envolvendo os princípios básicos da Engenharia Química, a transferência de massa e de calor sob influência da velocidade do movimento das partículas no meio e características intrínsecas ao material utilizado no processo.

O fenômeno da fluidização é observado quando um leito de partículas de pequeno tamanho (de poucas dezenas de micras a algumas unidades de milímetros) é submetido à passagem vertical e ascendente de um fluido, líquido ou gasoso. Para tanto, o leito de sólidos é acomodado em uma coluna, que pode ser seção transversal circular, quadrada ou retangular, e sustentado na base por uma placa perfurada ou microporosa, que desempenha o papel de distribuir uniformemente o fluido (DAVIDSON, 1985; *apud*, FELIPE, 2004).

Existem duas classificações de fluidização, são elas o particulado e o agregativo. Conforme Luz (2015), a fluidização particulada ocorre, geralmente, com os sólidos que se dispersam uniformemente sem a ocorrência de bolhas e é conhecido também como homogêneo. Já a fluidização agregativa apresenta formação de bolhas e é observada, principalmente, em sistemas gás-sólido. Devido à formação das bolhas esse tipo de fluidização é conhecido como heterogênea.

3.1 Escoamento em meios porosos

Os meios porosos são materiais sintéticos ou naturais (areias, certas formações rochosas, algumas cerâmicas, esponjas, fígado humano e outros) que possuem um conjunto de poros, vazios entre os elementos sólidos de sua composição, por onde pode passar um volume expressivo de fluido. Ao atravessar um meio poroso, o fluido o faz através dos vazios existentes entre as partículas. (FRANCIS, 1980).

Os poros em um meio poroso podem estar ou não interconectados. No caso de poros interconectados, temos um material poroso permeável, ou seja, os fluidos são capazes de escoar por duas cavidades penetrando através de uma face de uma parede que separa essas duas cavidades e emergir do outro lado.

As dimensões dos espaços vazios, ou poros, seguidos pelos fluidos em escoamentos dependem de fatores variáveis entre os quais pode-se citar o tamanho das partículas, bem como a esfericidade ou forma geométrica destas, e a rugosidade de sua superfície.

3.2 Regimes Fluidodinâmicos

Conforme Hou, Zhou e Yu (2012), o comportamento do estado de fluidização depende principalmente do grupo da classificação de Geldart (1986) ao qual pertencem as partículas. O grupo de partículas do tipo A, quando comparado aos outros grupos, é caracterizado por abranger três tipos de regime de fluidização. São eles o leito fixo, leito expandido e leito fluidizado e que compreendem as classificações abordadas no presente trabalho.

No processo de fluidização, inicialmente o leito comporta-se como leito fixo, e quando o fluxo de fluido ascendente através do leito de partículas adquire velocidade suficiente para suportar as partículas, porém sem arrastá-las junto com o fluido, dá-se início ao processo de fluidização.

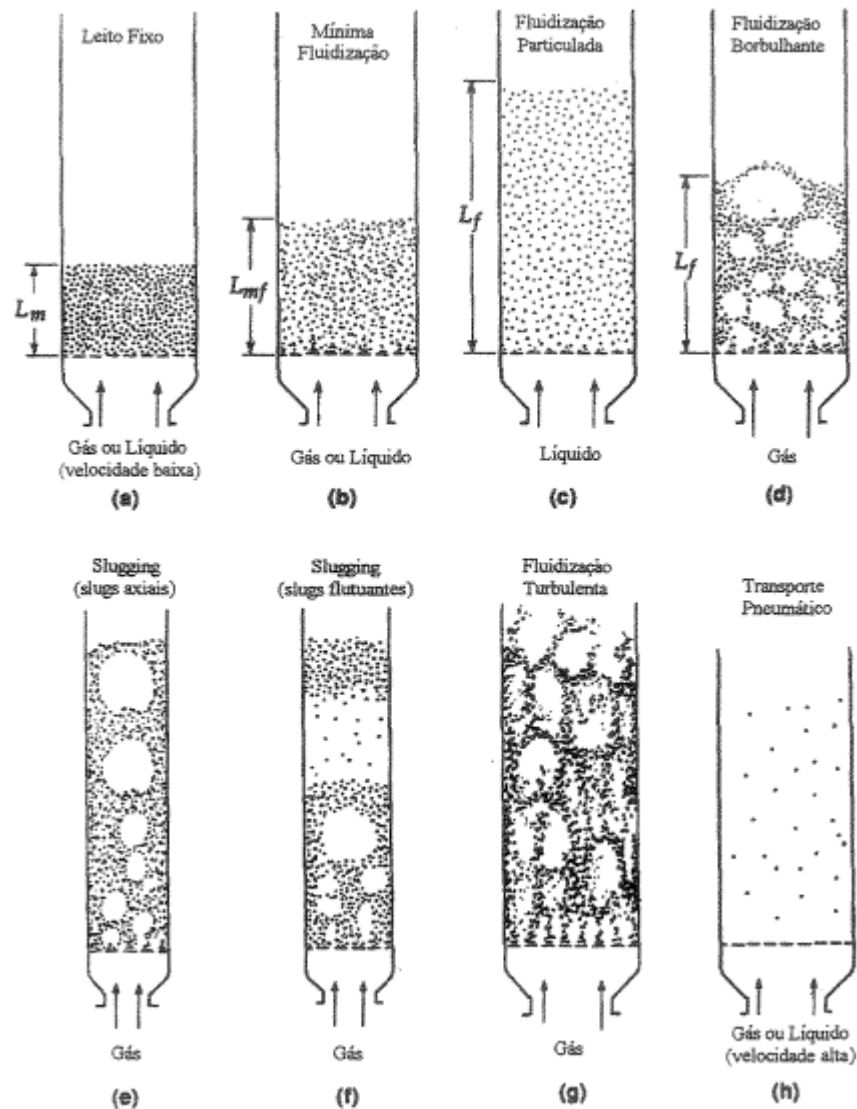
O leito fixo, caracteriza-se como uma estrutura composta de um aglomerado de partículas que se sobrepõem, no qual o fluido percorre os espaços entre as partículas sem que haja a expansão ou movimentação da estrutura (ISENMANN, 2012). O fluido não possui velocidade suficiente para fazer com que as partículas entrem em suspensão.

A partir do momento em que o fluido atinge a velocidade mínima de fluidização, promove-se uma expansão gradativa do leito, atingindo o estado de leito expandido.

Com o aumento da vazão do fluido, chega-se a uma condição na qual todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente do fluido, e a partir deste momento tem-se o leito fluidizado. Essa técnica introduziu uma significativa melhora no contato entre as fases reagentes, proporcionando elevação dos coeficientes de transferência de calor e de massa, e tornando o meio reacional com características pseudo-homogêneas. O leito fluidizado consiste em promover a suspensão do sólido finamente dividido em uma corrente ascendente de fluido a uma velocidade suficientemente capaz de promover a flutuação e movimentação vigorosa das partículas sólidas no meio reacional.

Na figura 1, a seguir, pode-se verificar os regimes decorrentes no processo de fluidização, do regime laminar ao turbulento, e suas transições em maiores detalhes.

Figura 1: Transição dos Regimes Fluidodinâmicos



A velocidade do fluido (gás ou líquido) estabelece a dinâmica do leito de partículas dentro da coluna (presença de bolhas de fluido ou agrupamentos de sólidos, grau de homogeneidade, perfil dos sólidos, arraste de partículas, etc.), que por sua vez, muda consideravelmente de um regime para outro (ARNALDOS e CASAL, 1996). Segundo Kunii e Levenspiel (1991) quando um fluido passa ascendentemente através de um leito de partículas finas (Figura 1.a), a uma vazão baixa, o fluido apenas percola pelos espaços entre as partículas estacionadas, ocorrendo um pequeno aumento no distanciamento entre elas e uma singela vibração e movimentações em regiões restritas, ao se acrescentar a velocidade do fluido. Nesta condição apresenta-se o leito fixo.

Aumentando-se a vazão, alcança-se uma condição em que todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente do gás ou líquido, cuja força de arrasto se iguala ao peso das

partículas, e a há uma leve expansão do leito em consequência do afastamento das partículas. Atinge-se nesse ponto a velocidade mínima de fluidização e as partículas começam a se mover e entram em suspensão. Para alguns autores, a partir deste momento o leito é considerado como sendo fluidizado, mesmo que minimamente (Figura 1.b).

O padrão na descrição da fluidização a partir deste ponto de velocidade tem-se comportamentos diferentes tratando-se de um líquido ou gás como fluido atuante no processo.

Em geral, sistemas líquido-sólido resultam em procedimentos estáveis, observa-se leitos com comportamento homogêneo, sem formação de bolhas de fluido, e com uma distribuição espacial uniforme de concentração e partículas sólidas. Essa interação é observada na Figura 1.c e recebe o nome de fluidização particulada, conforme Luz (2015), (citado na seção 3).

Em sistemas gás-sólido, com o aumento da velocidade mínima de fluidização, observa-se uma grande instabilidade no sistema, com formação de bolhas e canais preferenciais de gás na base do leito, que se originam dos jatos de ar provenientes dos orifícios da placa distribuidora. Vazões ainda maiores provocam agitações mais violentas e o movimento dos sólidos torna-se vigoroso. Não ocorre essencial arraste de sólidos; se uma fração de finos existe, estes podem ser arrastados em um período transitório inicial em sistemas em batelada, no entanto, logo em seguida ele cessa (FELIPE, 2004). Essa situação é denominada leito fluidizado heterogêneo ou borbulhante (Figura 1.d). A depender do tamanho das partículas utilizadas no recheio da coluna, pode-se obter uma situação de *slugs* axiais (partículas finas caem suavemente deslizando pelas paredes em volta das grandes bolhas de ar), como observado na Figura 1.e, e a situação de *slug* flutuante (partículas maiores que são empurradas para cima como um movimento pistonado e caem para o *slug* de baixo mediante essas colhas se coalesçam), como observado na Figura 1.f. Além disso, nesta última figura também observa-se o efeito de aglutinação de bolhas de que ao se unirem podem provocar um *slug* que ocupe toda uma área transversal do leito a depender da relação da altura do leito e o seu diâmetro.

Para uma vazão de gás suficientemente alta, ao ponto de ultrapassar a velocidade terminal das partículas, a formação de bolhas torna-se instável, observa-se um movimento turbulento de aglomerados de sólidos e vazios de gás de vários tamanhos e formas, fazendo a superfície superior do leito desaparecer. Neste ponto, tem-se a fluidização turbulenta, expressa na Figura 1.g.

Com o aumento da velocidade do fluido, sendo ele gás ou líquido, pode-se obter a situação exposta na Figura 1.h, na qual os sólidos são arrastados do leito com o fluido, promovendo o transporte pneumático dos sólidos.

Para a ocorrência de uma boa fluidização, o fenômeno tem dependência do estado físico do fluido e das características do material sólido, sobretudo a sua massa específica, granulometria e esfericidade.

3.3 Propriedades fluidodinâmicas do leito fluidizado

3.3.1 Velocidade Mínima de Fluidização (U_{mf})

A exata determinação da velocidade que marca o início da fluidização é imprescindível, por se tratar de um parâmetro que tem papel decisivo em cálculos de projeto na engenharia de fluidização. A velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) pode ser prevista teoricamente lançando mão de correlações empíricas existentes na literatura, cada uma delas limitada a condições experimentais restritas, como tamanho de partículas, fluido, etc. (GUPTA e SATHIYAMOORTHY, 1999). Há a forma alternativa e mais segura que seria obtendo-a experimentalmente por pelo menos três métodos diferentes, como citados por FELIPE (2004): o método da porosidade, de transferência de calor e o mais difundido, o método da queda de pressão.

3.3.1.1 Obtenção da U_{mf} através das Correlações Empíricas

Kunii & Levenspiel (1991) descrevem um método para obtenção da velocidade mínima de fluidização por meio da queda de pressão equivalente ao peso aparente do leito por unidade de área da secção transversal, conforme a equação 1, a seguir.

$$\Delta P = g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot H \quad (1)$$

onde: ΔP : queda de pressão no leito; g : aceleração da gravidade; ε : porosidade do leito; ρ_s : massa específica do sólido; ρ_f : massa específica do fluido; H : altura do leito.

Ergun, no final da década de 40, mostrou que a queda de pressão em leitos é composta de duas contribuições, sendo uma associada aos atritos viscosos e outra associada aos efeitos de inércia, que predomina no regime turbulento de fluidização, relacionando as contribuições na equação 2, a seguir.

$$\frac{\Delta P}{H} = \left[\frac{150 \times \mu \times q \times (1 - \varepsilon)^2}{(\varphi \times d_p)^2 \times \varepsilon^3} \right] + \left[\frac{1,75 \times \rho \times q^2 \times (1 - \varepsilon)}{\varphi \times d_p \times \varepsilon^3} \right] \quad (2)$$

onde: ΔP : queda de pressão no leito [Pa]; H: altura do leito [m]; μ : viscosidade do fluido [Kg/m.s]; q: velocidade do fluido [m/s]; ε : porosidade do leito; φ : esfericidade da partícula; d_p : diâmetro médio da partícula [μm]; ρ : massa específica do fluido [g/cm³].

Por meio desses princípios, foram desenvolvidas equações para determinar a velocidade mínima de fluidização, como as de Wen e Yu que estão descritas pelas equações de (3) a (6), conforme SOUZA(2012).

$$U_{mf} = \left[(33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar)^{1/2} - 33,7 \right] \cdot \frac{\mu}{\rho \cdot d_p} \quad (3)$$

sendo,

$$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 \cdot \rho \cdot (\rho_s - \rho)}{\mu^2} \quad (4)$$

Para $Re < 20$:

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}{1650 \cdot \mu} \quad (5)$$

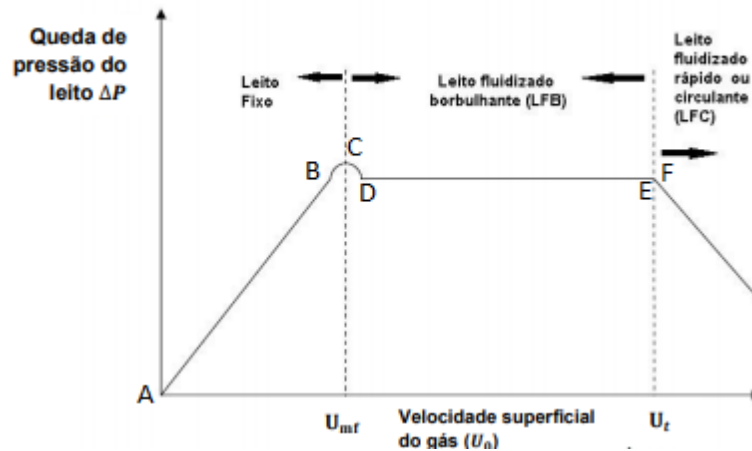
Para $Re > 1000$:

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g}{24,5 \cdot \rho} \quad (6)$$

3.3.1.2 Obtenção da U_{mf} através do método da Queda de Pressão

O gráfico que representa a curva de fluidodinâmica do processo é dada pela relação da queda de pressão no leito com o fluxo do fluido incipiente, e, através deste, pode-se determinar a U_{mf} do sólido. Na Figura 2 a seguir, tem-se a representação dessa curva. A seção AB representa o período do leito fixo, no qual o peso dos sólidos domina o processo, e a velocidade do fluido não é suficiente para iniciar a fluidização do leito. Em tal período, a variação de pressão cresce com o aumento da velocidade do fluido, pois, conforme Yang (2003), as substâncias do fluido interagem com vários pontos de contato do meio que transmitem forças friccionais, de adesão e de peso das partículas, e à medida que se aumenta a vazão do fluido, a velocidade deste acresce concomitantemente gerando a elevação no gradiente de pressão ao longo do leito, resultante das forças atuantes entre o fluido e o sólido.

Figura 2: Curva Fluidodinâmica de escoamento em meios porosos.



Fonte: Adaptado RATTI (2015).

No ponto C, atinge-se a velocidade mínima de fluidização, e com um acréscimo na vazão, a variação de pressão mantém-se constante. Nesse ponto, as partículas começam a se movimentar e se rearranjam dentro do leito. No período DE, tem-se o leito fluidizado e a altura do leito é expandida. Já a partir do ponto F, ocorre o transporte pneumático dos sólidos, que se torna presente quando se atinge a velocidade terminal das partículas no leito.

3.3.2 Velocidade terminal (U_t) de partículas

A velocidade terminal, U_t , é dada pela velocidade de queda livre das partículas. Esta velocidade quando superada provoca um arraste de partículas para fora do reator. A estimativa desta velocidade pode ser estabelecida a partir da mecânica dos fluidos, sendo expressa na Equação 7, a seguir:

$$U_t = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_p \cdot (\rho_s - \rho_g)}{3 \cdot \rho_g \cdot C_d}} \quad (7)$$

onde, C_d : Coeficiente de arrasto.

Tabela 1: Equações para o coeficiente de arrasto, C_d .

Equações para o coeficiente de arrasto (C_d)	
C_d	Re
$\frac{24}{Re}$	$Re < 0,4$
$\frac{10}{\sqrt{Re}}$	$0,4 < Re < 500$
0,43	$500 < Re < 200000$

3.4 Tipos de Recheio

Em 1830, Darcy realizou os primeiros experimentos de escoamento em meios porosos, verificando que o gradiente de pressão ($\Delta P/L$) é proporcional a velocidade do fluido (q) para vazões baixas e que a constante de proporcionalidade assumia valores diferentes para fluidos com viscosidades diferentes e para diferentes tipos de recheio. Diante disso, estudos voltaram-se para aprimorar as técnicas que determinavam a influência dos recheios aplicados nos diversos tipos de escoamento, bem como as principais características inerentes ao material que seriam responsáveis por interferir no escoamento propriamente dito.

A utilização destes materiais objetiva, de modo geral, entre outros motivos, maximizar a área de superfície por volume, distribuir a área uniformemente e promover a penetração uniforme do fluido ao longo do leito (KISTER, 1992). Para tanto, para cada tipo de aplicação deve selecionar as características desejadas conforme o processo, as condições de operação e propriedades dos materiais utilizados. Com isto, de acordo com Moreira (2012) o recheio deve:

- ser quimicamente inerte;
- possuir resistência química e à abrasão;
- garantir contato efetivo entre as fases;
- permitir a percolação do fluido com perda de carga razoável;
- ter custo para a condição ótima de operação frente ao seu porte.

Os recheios mais comuns são Anéis de Raschig, Anéis Pall, Anéis Lessing, Selas de Berl e Esferas, cujo preço depende do tamanho e do material que é fabricado. Os materiais mais comumente usados são: cerâmica, metais, vidro, plástico e carbono.

3.4.1 Propriedades dos Recheios

3.4.1.1 Esfericidade (ϕ)

A esfericidade é definida como o grau em que a forma de uma partícula se aproxima da forma esférica (DIAS, 2004). Essa é uma das definições apresentadas para a esfericidade derivada da aproximação de Wadell utilizando a relação volumétrica.

A esfericidade pode ser entendida como a razão entre a área superficial da esfera (A_e) que possui o mesmo volume da partícula e a área superficial da partícula (A_p), como apresenta a Equação 8:

$$\varphi = \frac{\text{Área superficial da esfera de igual volume da partícula} = A_e}{\text{Área superficial da partícula real} = A_p} \quad (8).$$



Para uma partícula esférica, a esfericidade é igual a um ($\varphi = 1$), e para uma partícula não esférica, de qualquer outra forma, o valor da esfericidade varia de zero a um ($0 < \varphi < 1$). Para muitos sólidos particulados a esfericidade é de em torno de 0,6 a 0,8, e para sólidos arredondados por abrasão pode ser superior a 0,95.

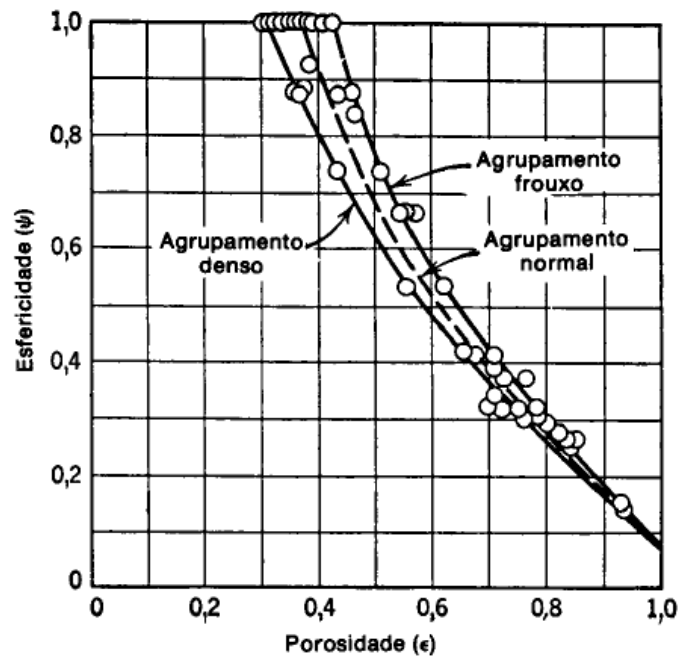
Para materiais granulares pequenos, é difícil se determinar o exato volume e área superficial da partícula e, para tanto, são utilizados ensaios de peneiramento ou análises microscópicas para a determinação dos diâmetros e ensaios de adsorção ou perda de carga para se determinar a área superficial (MCCABE, 2005).

3.4.1.2 Porosidade (ϵ)

A porosidade (ϵ) é um parâmetro físico adimensional que quantifica a fração de vazios de um material, utilizada para caracterizar o espaço total disponível para o fluxo (FOUST, 2008). Tal propriedade reproduz o percentual de vazios existentes no leito.

Como citado por Wanderley (2010), Bronw afirma que a porosidade do leito empacotado está relacionada com a esfericidade da partícula. A forma como as partículas se dispõe na coluna irá determinar a quantidade de espaços vazios no leito, e intrinsecamente a esfericidade da partícula influi de forma significativa na porosidade do meio. A figura 4, a seguir, expressa o resultado provocado na porosidade sob influência da esfericidade da partícula.

Figura 3: Esfericidade em função da porosidade em leitos preenchidos aleatoriamente com partículas de tamanhos uniformes.



Fonte: FOUST, 2008.

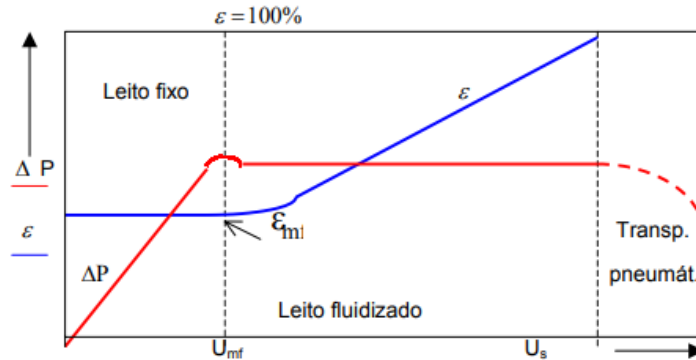
Como citado por autores como Foust (2008), Moreira (2012) e outros, a porosidade reduz com o aumento da esfericidade devido à área ocupada pelo sólido ser maior, assim sendo, os espaços vazios sofrem redução.

Em um leito fixo, a porosidade depende do tamanho da partícula e da distribuição de tamanhos, da forma e da rugosidade superficial da partícula, do método de empilhamento das partículas e da dimensão do vaso em relação ao diâmetro da partícula (FOUST, 2008).

E para o leito fluidizado, Wanderley (2010), cita que a porosidade e a velocidade mínima de fluidização são tidas como as mais importantes propriedades que influenciam na fluidodinâmica de um escoamento nesse tipo de processo. Com isso, essa propriedade, (ϵ), é cautelosamente avaliada no projeto de fluidização, valendo-se inclusive avaliar a sua influência durante o processo de escoamento.

Na figura 5, a seguir, observa-se o comportamento da curva fluidodinâmica da fluidização, como citado na seção 3.3.1.2, e atrelado a este, a curva de porosidade exhibe a sua reação ao aumento da velocidade e sua respectiva influência na perda de carga do processo.

Figura 4: Variação da queda de pressão (ΔP), e porosidade (ε), num leito de partículas solidas em função da velocidade superficial do gás, U_s .



Fonte: PUC-RIO: Capítulo 3: Fundamentos Teóricos

Na região do leito fixo, a porosidade é constante, justificado pelo fato das partículas manterem-se praticamente imóveis, e, conseqüentemente, os espaços vazios assim o permanecem também. Contrário a este comportamento, no leito fluidizado, tem-se a variação da porosidade que vai da mínima fluidização (ε_{mf}), até ao valor máximo (igual a 1) dando início ao transporte pneumático, ocasionado pela expansão do leito com o aumento da velocidade do fluido.

Em leitos com partículas de esfericidades variadas observam-se menores valores de porosidade quando comparados a leitos de partículas uniformes, em decorrência do deslizamento das partículas finas entre as maiores preenchendo os espaços vazios. Além disso, o tamanho da partícula e o tamanho do vaso se relacionam, pois, a distribuição do contato entre as partículas é interrompida pela parede e provoca uma maior fração de vazios em sua superfície (FOUST, 2008).

A determinação do valor da porosidade (ε) é definida na razão entre o volume de vazios (V_v) pelo volume total ocupado do leito (V_T), conforme mostra a Equação 9:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} \quad (9).$$

O volume ocupado do leito V_T é a soma do volume ocupado pelas partículas (V_s) e o volume de vazios entre elas (V_v). Sendo assim, a equação anterior sendo rearranjada assume a forma expressa na Equação 10:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_T} \quad (10).$$

3.5 Perda de Carga

A perda de carga é um resultado inevitável que ocorre em infinitos processos, e, por isso, é norteadora de muitos estudos que visam comprimir tal efeito. Podendo ser definida como a perda de energia que o fluido sofre durante o escoamento em uma tubulação, quando o fluido em movimento. Essa resistência ao escoamento devido ao atrito entre o fluido e a tubulação pode ser intensificada ou reduzida a depender de fatores tais como o tipo de fluido (viscosidade), tipo de material do tubo/coluna (rugosidade), diâmetro do tubo/coluna, quantidade de conexões, e, principalmente, no caso abordado, a presença dos recheios que acentuam o atrito em decorrência da resistência gerada pela esfericidade das partículas da fase sólida (superfície de contato).

A correlação mais utilizada para o cálculo da perda de carga em leitos fixos é a equação de Ergun que combina aditivamente os componentes laminar e turbulento da queda de pressão (ECOEDUCACIONAL, 2014). Em regime laminar, o primeiro termo do lado direito se torna dominante e a equação se reduz à de Kozeny-Carman, tendo vista o aumento linear da queda de pressão do fluido com o seu fluxo volumétrico (q) e independente da massa específica (ρ). Em condições turbulentas, o segundo termo se sobressai e o gradiente de pressão passa a ser diretamente proporcional à viscosidade do fluido e ao fluxo ao quadrado, conforma a equação (11), a seguir.

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\frac{150 \times \mu \times q \times (1 - \varepsilon)^2}{d_p^2 \times \varepsilon^3} \right] + \left[\frac{1,75 \times \rho \times q^2 \times (1 - \varepsilon)}{d_p \times \varepsilon^3} \right] \quad (11)$$

Para particulados não perfeitamente esféricos, o termo do diâmetro médio da Equação de Ergun é corrigido pela esfericidade (ϕ), como apresenta a Equação 2 (citada na seção 3.3.1.1) tendo vista a estimativa do valor da perda de carga em razão da não uniformidade das partículas (QUARANTA, 2016).

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais e Método

Neste trabalho foram conduzidos ensaios experimentais no Laboratório de Operações Unitárias pertencente ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Para o escopo do presente trabalho, são elencados dois ensaios:

- Ensaio de porosidade do leito fluidizado, e;

- Ensaio de perda de carga.

4.1.1 Porosidade

Visando determinar a porosidade, foi realizado o ensaio de porosidade do leito fluidizado, com base no princípio de Arquimedes. Este ensaio tem como objetivo determinar a porosidade do recheio através do preenchimento dos poros por um fluido, cujo volume utilizado representa os espaços vazios do meio, com o qual se calcula a porosidade.

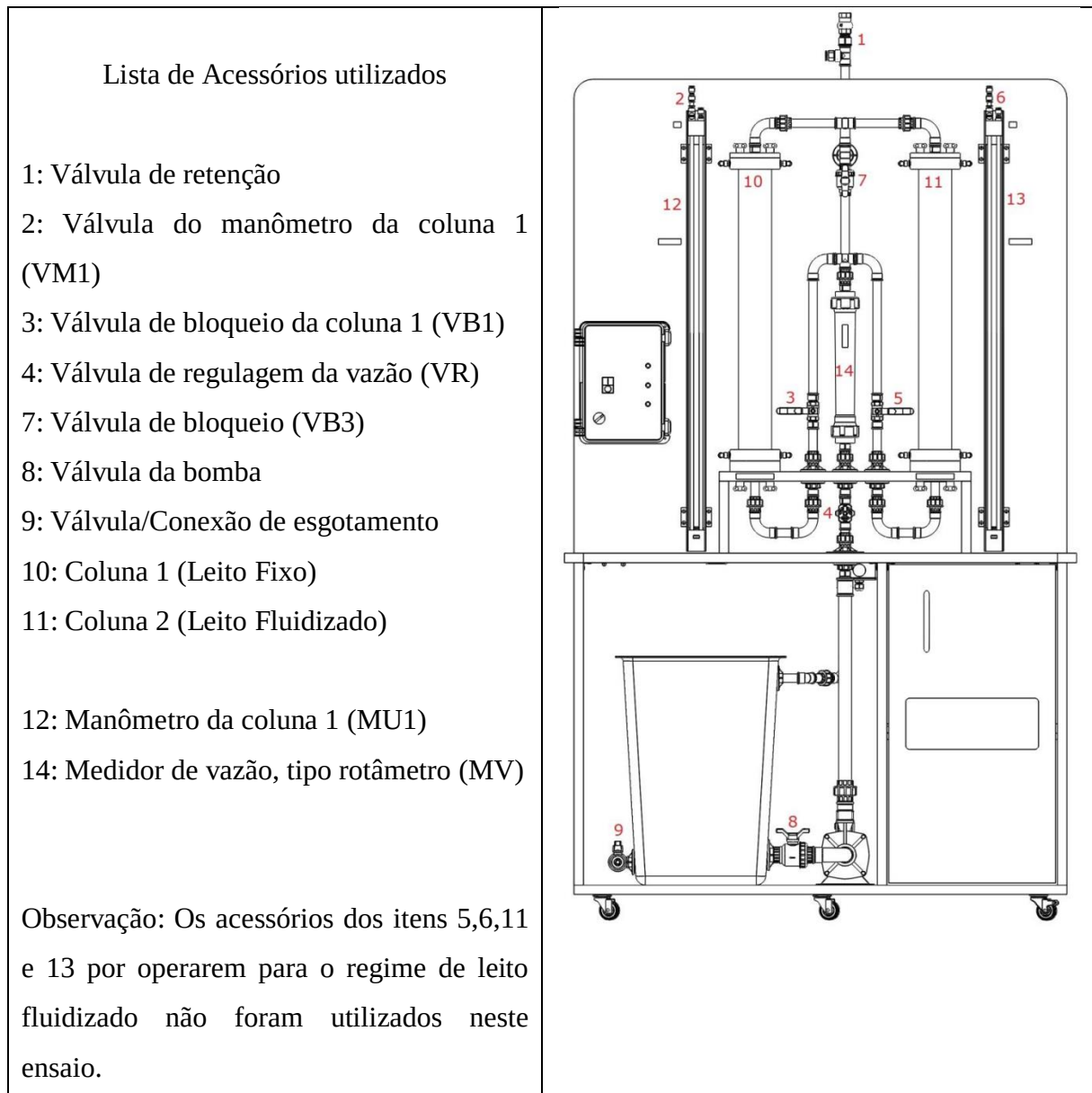
Materiais utilizados: recheio fornecido pelo fabricante (*Eco Educacional*); proveta de 500 mL; proveta de 2000mL; água a temperatura ambiente.

4.1.2 Perda de Carga

Para o ensaio de perda de carga, utilizou-se de um módulo para escoamento em meios porosos construído pela *Eco Educacional*, operando-se a Coluna 2, específica para leito fluidizado (item 11 da Figura 06), a qual possui diâmetro interno de 0,075 m (75 mm) e revestimento de acrílico.

Além desta coluna, este módulo experimental conta com a Coluna 1 para leito fixo (não utilizada neste trabalho), um reservatório de água, bomba centrífuga de ½ CV e demais acessórios. O recheio utilizado é constituído de pequenos grãos fornecidos pelo fabricante, e o fluido de passagem empregado foi água à temperatura ambiente.

Figura 5: Módulo experimental para o Ensaio de perda de carga.



Fonte: EcoEducacional, 2014 (adaptado).

4.2 Descrição Experimental

4.2.1 Ensaio da porosidade do leito fixo

Inicialmente, as partículas do recheio foram condicionadas até uma determinada altura (600mL) em uma proveta de 2000 mL, de forma a ocupar ao máximo os espaços, porém sem empacotar. Em outra proveta de 500 mL, colocou-se água, a temperatura ambiente e aferiu-se.

Em sequência, verteu-se parte a água da proveta de 500 mL na proveta de 2000 mL até cobrir superficialmente as pedras.

A diferença do volume remanescente de água na proveta de 500 mL e o volume inicial representa o quantitativo de espaços vazios no volume de pedras. A porosidade é calculada pela razão do volume ocupado pelos espaços vazios e o volume das partículas.

4.2.2 Ensaio de perda de carga

Este ensaio visa determinar, experimentalmente, os valores de perda de carga de um escoamento em meio poroso de um leito fixo para diferentes vazões.

Em um primeiro momento, foi realizado o acondicionamento do módulo com o enchimento do reservatório em seu nível máximo, com água a temperatura ambiente. Aferiu-se a altura inicial do leito com auxílio de fita métrica convencional. Neste procedimento, mantiveram-se todas as válvulas do circuito abertas de forma a permitir a selagem hidráulica do circuito de sucção e bomba, prevenindo assim a possibilidade de cavitação. A partir daí todas as válvulas foram fechadas (Figura 06). Com o módulo devidamente acondicionado, abre-se a VB2 e a VM2 - válvula do manômetro da coluna 2 (2) e liga-se a bomba. Lentamente, abre-se a VR - válvula de regulagem de vazão e aumentam-se os valores de vazões, em intervalos discretos, até um máximo de vazão (iminência de movimento de alguma partícula do topo do leito ou risco do manômetro estourar).

Para cada valor de vazão, anota-se seu valor e realiza-se a leitura da variação de altura da coluna de clorofórmio no manômetro (12) (Figura 06). O procedimento de progressão de vazões deve ser realizado cuidadosamente a fim de garantir precisão nos resultados com a menor interferência de vibrações possíveis, bem como evitar o risco de danificação ou ruptura do módulo.

Para se verificar a possibilidade de ocorrência de histereses, que podem ser causadas pela expansão do leito ou ser detectada erroneamente por leituras falhas do fluido manométrico, realiza-se a medição dos mesmos pontos em sequência contrária. Ou seja, ao atingir-se a vazão máxima, regula-se lentamente a vazão da válvula VR (4), nos mesmos pontos medidos, até cessar o escoamento. Ao término, fecham-se sequencialmente a VR - válvula de regulagem de vazão (4), a VB2 - de bloqueio da coluna 2 (3) e a VM2 - válvula do manômetro (2), e desliga-se a bomba.

Conforme as leituras da altura da coluna do tubo em U com clorofórmio, calculou-se o valor de pressão manométrica aplicando-se a Equação 13, segundo o princípio de Stevin (HOLANDA, 2012):

$$P = (\rho_{\text{clorofórmio}} - \rho_{\text{água}}) \cdot g \cdot \Delta h \quad (13)$$

onde: P – pressão manométrica (Pa); Δh – soma das medidas obtidas no manômetro do tubo em U (m); $\rho_{\text{clorofórmio}}$ – massa específica do clorofórmio (kg/m^3); $\rho_{\text{água}}$ – massa específica da água (kg/m^3); g – aceleração da gravidade (m/s^2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades do Sistema de Escoamento

5.1.1 Caracterização das partículas

As partículas utilizadas possuíam diâmetros que variavam de 0,00167 a 0,00238 m (Ecoeducacional, 2014). Assim, para a determinação do diâmetro médio destas partículas (d_m), foi calculada a média aritmética e obtido desta forma o valor de 0,002025m.

Além disso, de acordo com a Ecoeducacional (2014), a esfericidade (ϕ) das partículas utilizadas no experimento é de 1,00.

Determinou-se ainda a massa específica aparente do sólido, seguindo-se o procedimento de completar uma proveta de 250mL com o sólido em questão, pesou-se em balança analítica com a proveta devidamente tarada. Em seguida, dividiu-se a massa obtida pelo volume de sólido utilizado, obtendo-se então a massa específica aparente, conforme a equação a seguir:

$$\rho_s = \frac{0,308 \text{ Kg}}{0,00025 \text{ m}^3} = 1232 \text{ Kg/m}^3$$

5.1.2 Caracterização da coluna

De acordo com a Ecoeducacional (2014), o valor do diâmetro interno do tubo é de 0,075m. Com base neste valor, calcula-se o valor da área transversal do tubo, logo, a área da

seção transversal de escoamento do fluido, através da Equação 11, pela qual foi obtido o valor de 0,004418 m².

$$A = \pi r^2 = 3,1416 \times \left(\frac{0,075}{2}\right)^2 = 0,004418 \text{ m}^2 \quad (11)$$

Com o auxílio de uma fita métrica convencional, mediu-se o valor da altura do recheio dentro da coluna, onde se determinou a altura do leito de 0,69 m.

5.1.3 Caracterização dos fluidos

Dois fluidos diferentes foram utilizados nos experimentos deste trabalho: água e clorofórmio. As propriedades destes fluidos foram obtidas no Perry's Handbook (1998) sempre para a temperatura de 20°C. Assim, o valor de densidade da água foi de 998 kg/m³ e clorofórmio de 1489 kg/m³, e a viscosidade da água de 1,014 x 10⁻³ Pa.s.

5.1.4 Caracterização do leito

5.1.4.1 Porosidade

A determinação da porosidade consistiu nos resultados obtidos conforme descrito no item 4.2.1. Assim, com o preenchimento de recheio na proveta de 2.000mL na altura de 600mL (V_T), completou-se até a cobertura utilizando 266mL de água (V_L). Logo, a medida de espaços vazios entre as partículas do meio, que corresponde a razão do volume de água pelo volume de recheio imerso em água, foi de 0,44, como aplicado na Equação 03 e mostrado abaixo na Equação 12.

$$\varepsilon = \frac{V_L}{V_T} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{266 \text{ ml}}{600 \text{ ml}} = 0,44 \quad (12)$$

Dessa maneira, as propriedades estabelecidas para a determinação de características das partículas, da coluna, do fluido e do leito, obtidas na seção 5.1, podem ser apresentadas, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de caracterização do sistema de escoamento.

Caracterização	Legenda	Descrição	Valor	Unidade
Partícula	d_m	Diâmetro médio dos poros	0,002025	m
	φ	Esfericidade	1,00	-
	ρ_s	Massa específica aparente do	1232	kg/m ³

		sólido		
Coluna	d_T	Diâmetro do Tubo	0,075	m
	A_T	Área transversal do tubo	0,004418	m ²
	L	Comprimento do tubo	0,690	m
Fluido	ρ_C	Densidade do Clorofórmio (20°C)	1489	kg/m ³
	ρ_{H2O}	Densidade da Água (20°C)	998	kg/m ³
	μ_{H2O}	Viscosidade da Água (20°C)	1,0040E-3	Pa.s
Leito	ε	Porosidade	0,44	-

Fonte: Autor, 2019.

5.2 Escoamento em leito fluidizado

5.2.1 Determinação do Fluxo volumétrico

Para a determinação da perda de carga em leitos fixos pela equação de Ergun, os valores de vazão obtidos no rotâmetro do módulo do experimento, devem ser convertidos para o fluxo que escoa pela área da seção transversal do tubo. Desta forma, calcula-se para cada vazão medida o fluxo correspondente pela Equação 14, em unidades de $\frac{m^3}{s \times m^2}$, que são apresentados na Tabela 3.

$$q = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

Tabela 3: Conversão das vazões em fluxos volumétricos.

Vazão(Q) (L/min)	Fluxo - q (m ³ /s.m ²)
2	0,00755
3	0,01132
4	0,01509
5	0,01886
6	0,02264
7	0,02641
8	0,03018
9	0,03395
10	0,03773
11	0,04150
12	0,04527

Fonte: Autor, 2019.

5.2.2 Determinação da Pressão manométrica

Para a determinação da pressão (ΔP), foram medidas as alturas das colunas manométricas com clorofórmio (U_{entrada} , sendo a coluna da esquerda e, $U_{\text{saída}}$, a coluna da direita, em seguida somadas. Com base na Equação 13, determinaram-se as pressões manométricas para cada vazão, como mostra a Tabela 04.

Tabela 4: Pressão manométrica em função do fluxo de água.

Dados Experimentais					
Vazão(Q) (L/min)	Fluxo - q (m³/s.m²)	Uentrada (m)	Usaída (m)	h (m)	ΔP (Pa)
2	0,00755	-0,098	0,097	0,195	939,26
3	0,01132	-0,14	0,139	0,279	1343,86
4	0,01509	-0,225	0,229	0,454	2186,79
5	0,01886	-0,355	0,35	0,705	3395,78
6	0,02264	-0,406	0,37	0,776	3737,77
7	0,02641	-0,402	0,392	0,794	3824,47
8	0,03018	-0,391	0,385	0,776	3737,77
9	0,03395	-0,39	0,383	0,773	3723,32
10	0,03773	-0,387	0,382	0,769	3704,05
11	0,04150	-0,389	0,384	0,773	3723,32
12	0,04527	-0,389	0,385	0,774	3728,13

Fonte: Autor, 2019.

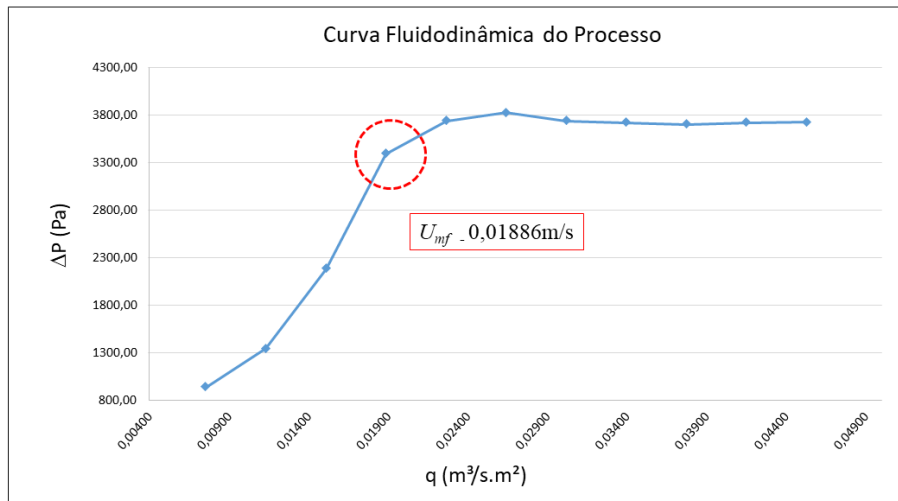
Para obter o valor diferença de pressão (ΔP) do fluido utilizado utilizou-se do princípio de Stevin (HOLANDA, 2012), na qual tem-se a seguinte equação:

$$\Delta P = (\rho_{\text{clorofórmio}} - \rho_{\text{água}}) \cdot g \cdot \Delta H$$

onde: $\rho_{\text{clorofórmio}} = 1489 \text{ Kg/m}^3$; $\rho_{\text{água}} = 998 \text{ Kg/m}^3$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

A partir dos resultados obtidos, os valores da pressão manométrica foram plotados em função do fluxo, como mostra a Figura 7. Observa-se a coerência dos dados através da dependência da pressão em função do fluxo de forma progressiva e crescente até atingir a velocidade mínima de fluidização, e a partir deste ponto, a queda de pressão torna-se praticamente constante com o aumento da velocidade do fluido circulante, conforme descrito na seção 3.3.1.2.

Figura 6: Curva Fluidodinâmica do escoamento.



Fonte: Autor, 2019.

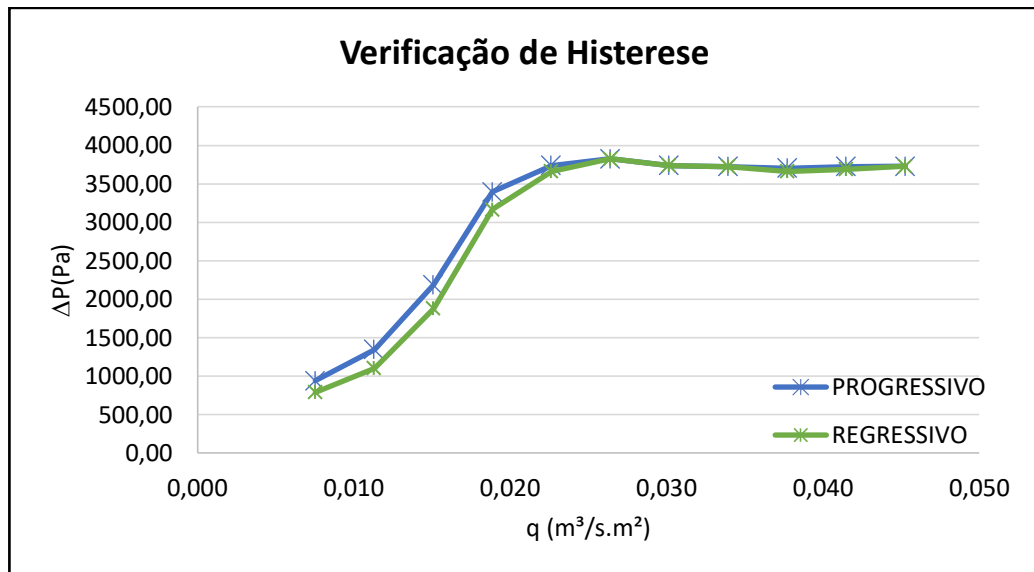
5.2.3 Determinação da U_{mf} pelo método da Queda de Pressão

De acordo com a Figura 7, que representa a curva fluidodinâmica do escoamento, pode-se observar que a U_{mf} equivale a 0,01886m/s.

5.2.4 Verificação de ocorrência de histerese

Com o objetivo de analisar a ocorrência de histerese, bem como verificar possíveis erros de leitura e medição de dados, novas medidas foram efetuadas. Para tanto, a sequência de medição da pressão em função da vazão foi realizada de forma regressiva, iniciando do último ao primeiro valor de vazão do experimento anterior. A pressão manométrica foi calculada com os valores das alturas das colunas de clorofórmio com base na Equação 13, em função de cada fluxo volumétrico, como apresenta a Figura 8. Observa-se a sobreposição da linha do fluxo regressivo sobre a linha do fluxo progressivo numa parte do processo, e em outra, tem-se um comportamento similar, porém com valores reduzidos (regressivo) quando comparados ao processo inicial (progressivo). Este comportamento evidencia uma pequena histerese do processo, que pode ser compreendida pelo rearranjo das partículas ao reduzir a vazão do fluido incipiente, saindo da zona de fluidização para leito fixo, provocando essa alteração na variação de pressão do sistema.

Figura 7: Curvas Fluidodinâmicas com a operação progressiva e regressiva do fluxo de água.



Fonte: Autor, 2019.

5.2.5 Determinação da expansão do leito

A partir do momento em que o fluido atinge a velocidade mínima de fluidização, promove-se uma expansão gradativa do leito, que é observada com o aumento da vazão do fluido incipiente, conforme a Figura 09 a seguir. O leito enquanto apresenta-se como fixo, mantém-se constante na altura de 0,488m, e após atingir a U_{mf} , a altura aumenta consequentemente com a progressão da vazão de alimentação do fluido, chegando a atingir 0,640m de altura.

Figura 8: Curva de Expansão do Leito Fluidizado



Fonte: Autor, 2019.

5.3 Determinação da perda de carga

5.3.1 Determinação da perda de carga experimental

A perda de carga experimental foi determinada através da razão do valor de pressão (Tabela 4), sobre o comprimento do tubo ocupado pela coluna de recheio ($H = 0,64\text{m}$) para cada medida de fluxo. Os valores encontrados de perda de carga são apresentados na Tabela 5 na seção seguinte.

5.3.2 Determinação da perda de carga empírica

Tratando-se de um regime que se comporta como leito fixo, a Equação de Ergun fornece os valores empíricos da perda de carga.

Com base nos parâmetros de caracterização de partículas, coluna, fluidos e leito, apresentados na Tabela 2, a perda de carga $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)$ pode ser calculada pela equação de Ergun em função do fluxo volumétrico (q), conforme a Equação 2. Os dados obtidos são mostrados na Tabela 05.

$$\frac{\Delta P}{H} = \left[\frac{150 \times \mu \times q \times (1 - \varepsilon)^2}{(\varphi \times d_p)^2 \times \varepsilon^3} \right] + \left[\frac{1,75 \times \rho \times q^2 \times (1 - \varepsilon)}{\varphi \times d_p \times \varepsilon^3} \right] \quad (2)$$

Ao analisar a perda de carga a partir do momento que o leito se comporta como leito fluidizado, temos a equação a seguir, de acordo com a Ecoeducacional (2014):

$$\frac{\Delta P}{H} = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g$$

Na tabela 5, a seguir, observa-se a perda de carga teórica em função do fluxo volumétrico, na qual até atingir a vazão de 5L/min, utilizou-se a equação de Ergun, e após esse valor, utilizou-se a equação anterior, pois, este representa o valor da vazão na qual ocorre a transição de leito fixo para leito fluidizado.

Tabela 5: Perda de carga teórica e calculada experimentalmente em função do fluxo volumétrico.

Perda de Carga					
Tipo de leito	Vazão(Q) (L/min)	Fluxo - q (m³/s.m²)	$\Delta P/H$ (experimental) (Pa/m)	$\Delta P/H$ (teórica) (Pa/m)	Variação Percentual
Leito Fixo	2	0,00755	1467,59	1309,0019756	-12,11%
	3	0,01132	2099,78	2198,7733006	-4,50%
	4	0,01509	3416,85	3245,3915172	-6,67%

	5	0,01886	5305,91	4448,8566252	-19,3%
Leito Fluidizado	6	0,02264	5840,26	6727,8288	-13,2%
	7	0,02641	5975,73	6727,8288	-11,2%
	8	0,03018	5840,26	6727,8288	-13,2%
	9	0,03395	5817,68	6727,8288	-13,5%
	10	0,03773	5787,58	6727,8288	-13,9%
	11	0,04150	5817,68	6727,8288	-13,5%
	12	0,04527	5825,21	6727,8288	-13,4%

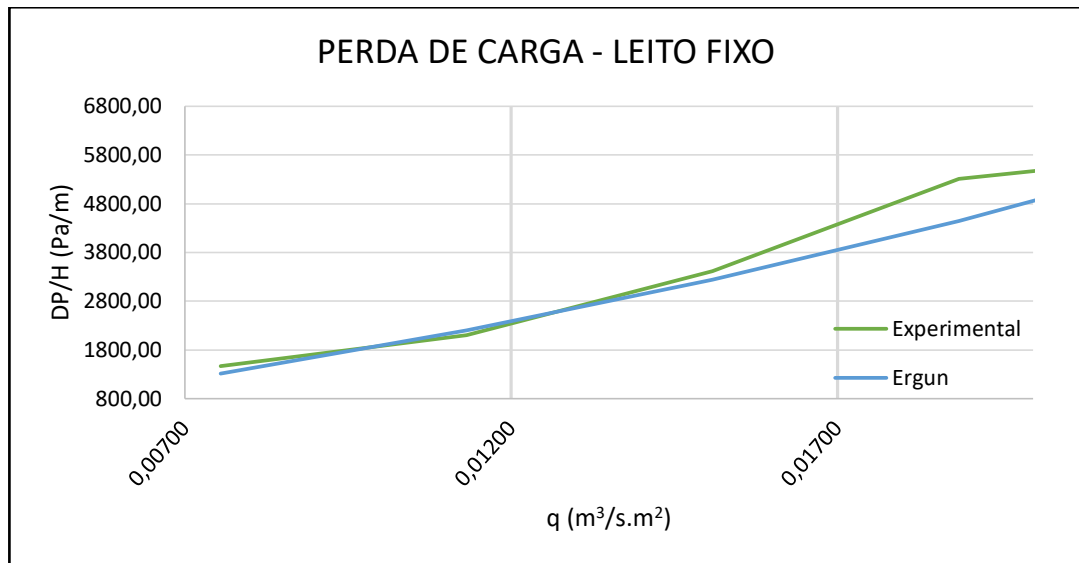
Fonte: Autor, 2019.

Apesar das diferenças percentuais nos valores de perda de carga calculadas e experimentais variarem de |-4,50%| a |19,30%| ponto a ponto para o leito fixo e variarem de |-11,20%| a |13,90%| ponto a ponto para o leito fluidizado, o comportamento da curva de perda de carga em função do fluxo apresentaram tendências similares, como mostram as figuras na seção a seguir.

5.3.3 Comparação dos métodos de determinação da perda de carga

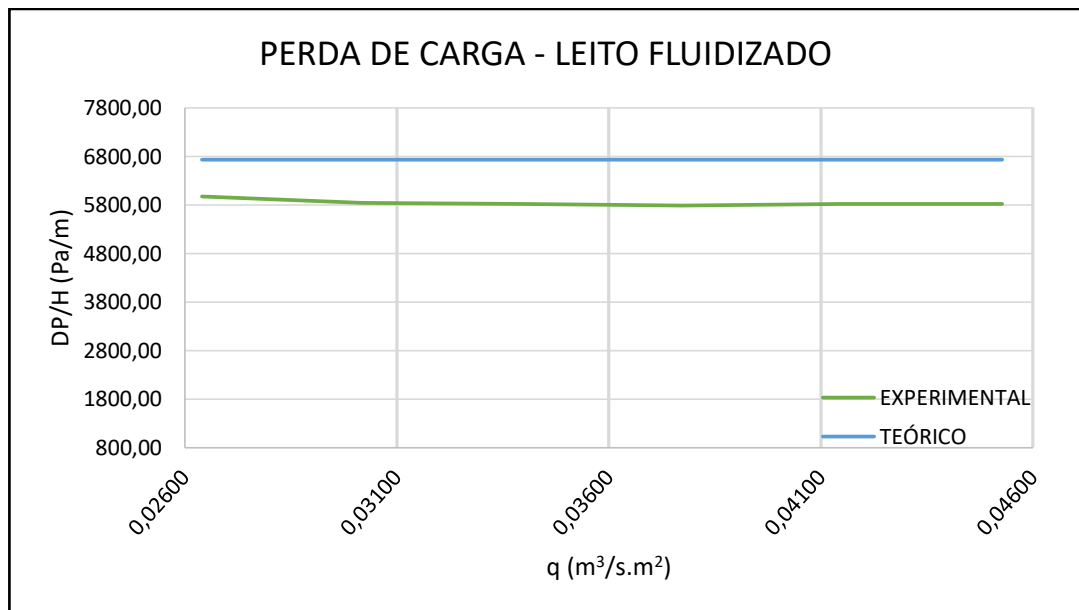
A fim de verificar os dados obtidos pelos dois métodos, os valores de perda de carga obtidos experimentalmente e pela equação teórica, foram plotados no mesmo gráfico em função do fluxo volumétrico. Primeiramente, observando o comportamento do leito fixo, como mostra a Figura 10, e em seguida, o comportamento para o leito fluidizado, conforme a figura 11.

Figura 9: Perda de carga teórica e experimental para o comportamento de leito fixo.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 10: Perda de carga teórica e experimental para o comportamento de leito fluidizado.



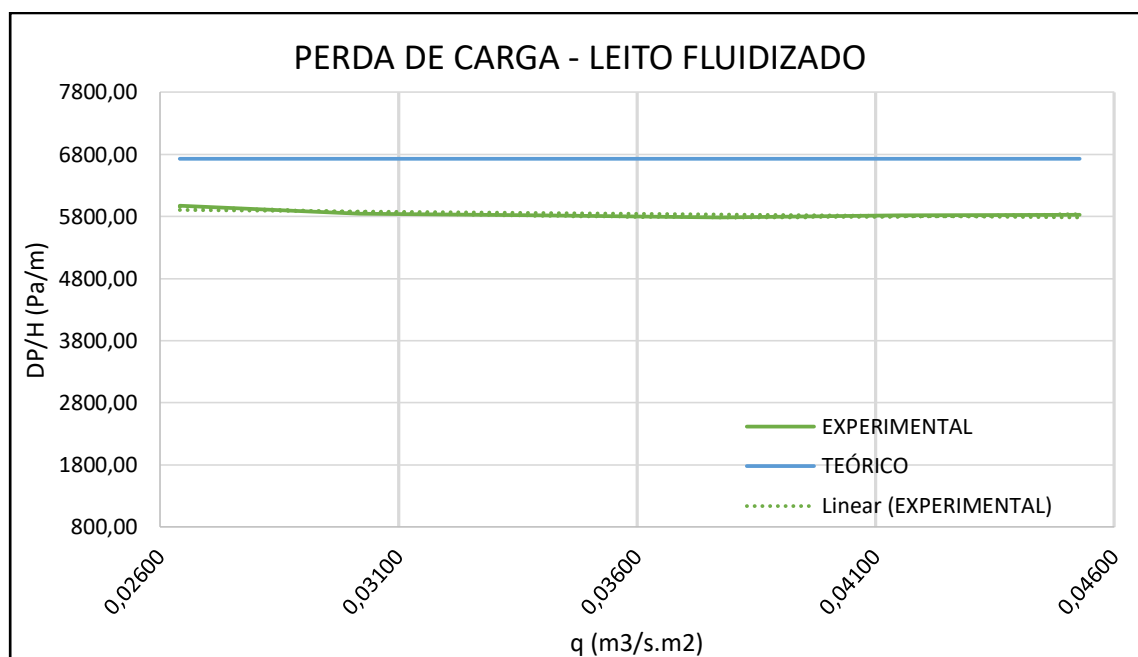
Fonte: Autor, 2019.

Observa-se comportamentos semelhantes em ambas situações, valendo-se destacar certa disparidade no regime de leito fluidizado, no qual salienta-se a massa específica aparente do sólido utilizada para calcular a perda de carga, podendo ter causado tal desvio.

5.4 Equação empírica para perda de carga

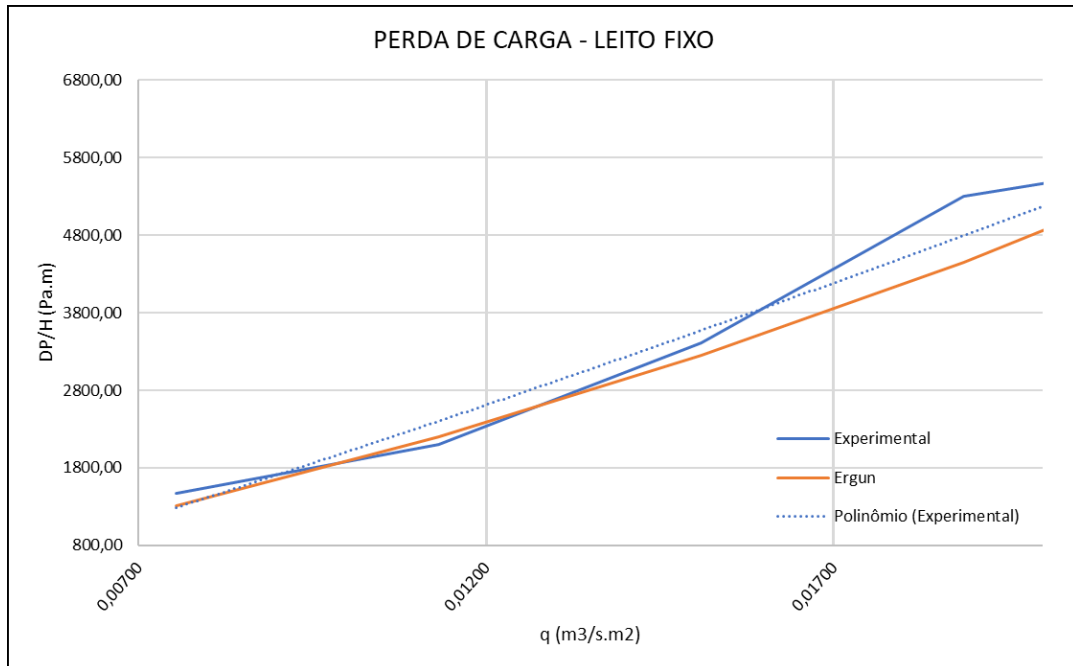
De acordo com os valores de perda de carga em função do fluxo volumétrico obtidos experimentalmente no manômetro de clorofórmio e apresentados na Figura 07, pode-se gerar uma equação para prever a tendência do comportamento da queda de pressão em função do fluxo no módulo estudado. Para tal, deve-se gerar uma curva de tendência de valores como mostra a Figuras 12 e 13.

Figura 11: Ajuste polinomial com curva característica da queda de pressão manométrica para leito fluidizado



Fonte: Autor, 2019.

Figura 12: Ajuste polinomial com curva característica da queda de pressão manométrica para leito fluidizado



Fonte: Autor, 2019.

Assim, a equação empírica que descreve o comportamento do escoamento do fluido quanto a queda de pressão em função do fluxo aplicado foi gerada através de um ajuste de uma função de polinômio de ordem segunda, no intervalo de regime em leito fixo teve R^2 de 0,9686, enquanto para o regime de leito fluidizado foi de 0,921, e as equações são apresentadas a seguir.

Leito fixo:

$$\frac{\Delta P}{H}(q) = 2,0 \times 10^6 q^2 + 259793 q - 778,2 \quad (15)$$

Leito fluidizado:

$$\frac{\Delta P}{H}(q) = 1,0 \times 10^6 q^2 + 89692 q - 7518,5 \quad (16)$$

Em que:

q : fluxo volumétrico ($\text{m}^3/\text{s.m}^2$);

$\frac{\Delta P}{H}$: queda de pressão (Pa/m).

Tais equações foram obtidas aplicando o método de regressão linear sob os dados experimentais obtidos.

6 CONCLUSÃO

Por meio dos experimentos e cálculos realizados, pôde-se determinar a porosidade das partículas do recheio do leito estudado, e, conseqüentemente, observou-se a perda de carga do sistema de leito fluidizado com posterior determinação de sua equação empírica relacionando-a com a vazão/fluxo do fluido.

A Equação de Ergun representou satisfatoriamente os dados experimentais de perda de carga, atendendo, assim, o objetivo de determinar a perda de carga através de diferentes modelos de equações, permitindo assim um cálculo rápido e preciso da perda de carga do sistema estudado. Além disso, notou-se que não foi observado o fenômeno da histerese nos dados experimentais obtidos para a perda de carga do sistema estudado.

REFERÊNCIAS

DIAS, J. A.; **A ANÁLISE SEDIMENTAR E O CONHECIMENTO DOS SISTEMAS MARINHOS**. Universidade do Algarve. Faro – PT. 2004.

ARNALDOS, J.; CASAL, J.; Prediction of transition velocities and hydridynamical regimes in fluidized beds. **Power Technology**. 86, 285-298. 1996.

ECO EDUCACIONAL, NCD INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE EQUIPAMENTOS DIDÁTICOS LTDA. **Experimento de Escoamento em Meios Porosos: Determinação da Perda de Carga e de Fluidização**– Sistema Sólido-Líquido (Roteiro de Aula Prática). São José, 2014.

FELIPE; C. A. S. F.; **IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DE REGIME FLUIDODINÂMICO EM LEITOS FLUIDIZADOS GÁS-SÓLIDO**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP. 2004.

FRANCIS, F. O. **Hidráulica de Meios Permeáveis; Escoamento em meios porosos**. Rio de Janeiro: Interciência, 1980.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. 2ed. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois/LTC, 2008.

GELDART, D. **Gas fluidization technology**, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1986.

GUPTA, C. K.; SATHYAMOORTHY, D.; **Fluid bed technology in materials processing**. CRC Press, Boca Raton, 1999.

HOLANDA, M. R.; **A pressão num ponto de um líquido em equilíbrio – Princípio de Stevin**. Notas de aula. Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de Lorena. São Paulo – SP. 2012.

HOU Q. F.; ZHOU, Z. Y.; YU, A. B.; Micromechanical modeling and analysis of different flow regimes in gas fluidization. **Chemical Engineering Science**. 84, 449-469. 2012.

ISENMANN, A. F. **Operações unitárias na indústria química / Armin Franz Isenmann**. Timóteo. 2012. 1a Edição.

KISTER, Henry Z. **Distillation Design**. McGraw-Hill Education, 1992.

Kunii, D. e Levenspiel, O. (1991) **Fluidization Engineering**. 2ª Edição, Butterworth-Heinemann, Boston.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 2005.

LUZ, N. C.; **ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FLUIDIZADO: ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL**. Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande – RS. 2015.

MOREIRA, M. F. P., **Apostila de Leito Fixo e Leito Fluidizado**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Toledo – PR, 2012.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill, 1998.

QUARANTA, I. C. C., LIMA, L., SALMITO, M., LIMA, M. F. M., GOMES, R. F., AZEVEDO, D. **Protótipo de leito fixo para avaliar a perda de carga em escoamento em meio poroso**. 2016.

RATTI, G. B.; **EFEITO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO E DO INVENTÁRIO DE SÓLIDOS NO PERFIL DE PRESSÃO DE UMA VÁLVULA LOOPSEAL ACOPLADA A UM SISTEMA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa – PR. 2015.

WANDERLEY; P. R. B.; **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM REATOR DE OXICLORAÇÃO EM LEITO FLUIDIZADO PARA PRODUÇÃO DO 1,2-DICLOROETANO**. Universidade Acadêmica Centro de Tecnologia. Maceió – AL. 2010.

YANG, W.C. **Flow through fixed beds. Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. Boca Raton: CRC Press, 2003.