



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CLAUBER LUCIAN DA SILVA MAIA

**DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA PREDIÇÃO DE PERDA DE
CARGA NO MÓDULO DE LEITO FIXO DE AULAS PRÁTICAS**

JOÃO PESSOA/PB
2018

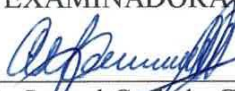
CLAUBER LUCIAN DA SILVA MAIA

**DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA PREDIÇÃO DE PERDA
DE CARGA NO MÓDULO DE LEITO FIXO DE AULAS PRÁTICAS**

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, 19 de outubro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Alfredo Ismael Curbelo Garnica
Orientador.
Mat. 1453020



Profa. Dra. Fabíola Dias da Silva Curbelo
Mat. 2453534



Mestranda. Elayne Andrade Araújo
Mat. 20181015600

JOÃO PESSOA/PB
2018

M217d Maia, Clauber Lucian da Silva

Determinação de equação empírica para predição da perda de carga no módulo de leito fixo de aulas práticas / Clauber Lucian da Silva Maia. – João Pessoa, 2018.

46f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ismael Curbelo Garnica.
Monografia (Graduação) - UFPB / CT.

1. Leito Fixo 2. Perda de carga 3. Aulas experimentais. I. Garnica, Alfredo Ismael Curbelo. II. Título.

UFPB/BC

CLAUBER LUCIAN DA SILVA MAIA

**DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA PREDIÇÃO DE PERDA DE
CARGA NO MÓDULO DE LEITO FIXO DE AULAS PRÁTICAS**

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, 19 de outubro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

**JOÃO PESSOA/PB
2018**

DEDICATÓRIA

Ao amor de meu pai e minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

A minha mãe Maria José por sempre lutar em favor da minha felicidade, me fazer confiar e me apoiar nos meus sonhos.

Ao meu pai Clebes Luciano pela sua irrevogável fidelidade e sua pronta e resoluta ajuda.

Ao meu irmão Cristiano Maia e sua família pela cumplicidade verdadeira e por se fazer presente em minha vida.

Aos meus familiares que me energizam com a luz fraterna.

As referencias de mulher de garra, minha avó Terezinha e bisavó Severina, pela luta pertinaz e doação incondicional.

Ao meu saudoso primo Ardilis, que de onde estiver celebra junto com nossa família essa conquista.

Ao meu companheiro Tiago Castelo, pelo cuidado sincero e terno carinho nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Alfredo Curbelo, pela mentoria e pelo primor em educar para prática profissional.

Ao meu irmão Gustav Oerting precioso amigo Caio Nesello pelas reflexões e ensinamentos de vida.

Aos meus amigos do IFPB por me fazerem confiar que é possível ser grande.

Aos meus leais amigos Aldo Alves, Alex Pimentel e Glaydson Gonçalves por me acompanhar e me entender de forma singular.

Aos meus amigos Lucas Galantine e Ana Pergentino que durante o intercâmbio se tornaram minha família.

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 fixo representando, portanto um tópico essencial na formação do profissional engenheiro. Este estudo tem como objetivo determinar a perda de carga em leito fixo 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 permeabilidade e perda de carga obtidos com base na Equação de Darcy e Ergun respectivamente, se mostraram satisfatórias na determinação teórica dos parâmetros. Com base nos dados experimentais foi determinada uma equação polinomial para prever os valores de perda de carga em função dos fluxos volumétricos, a qual apresentou em sua validação valores mais próximos dos experimentais do que aqueles obtidos pelas equações teóricas. 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 fixo, 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 fixed-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 permeability and head loss results were obtained based on Darcy's and Ergun's equations, respectively, and they were satisfactory in the theoretical determination of the parameters. Based on the experimental data, the polynomial equation was determined to predict the values of head loss as a function of the volumetric flows, which had in its validation values closer to the experimental ones than those obtained by the theoretical equations. In this way, the equation may assertively assist the student to determine the head loss in the studied module in future experiments.

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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO.....	13
2.1	Objetivo Geral.....	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1	Escoamento em meios porosos	14
3.1.1	Leito Fixo.....	14
3.1.2	Leito Fluidizado	15
3.2	Tipos de recheio.....	18
3.3	Propriedades do recheio.....	19
3.3.1	Esfericidade.....	19
3.3.2	Porosidade (ϵ).....	20
3.3.3	Permeabilidade (K)	22
3.4	Perda de Carga	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	Descrição dos acessórios e equipamentos	25
4.2	Descrição dos Experimentos.....	26
4.2.1	Ensaio da porosidade do leito fixo.....	26
4.2.2	Ensaio de perda de carga.....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Propriedades do Leito e do Fluido.....	29
5.1.1	Caracterização das partículas	29
5.1.2	Caracterização da coluna	29
5.1.3	Caracterização dos fluidos	30
5.1.4	Caracterização do leito.....	30

5.2	Escoamento em leito fixo	31
5.2.1	Determinação do Fluxo volumétrico.....	31
5.2.2	Determinação da Pressão manométrica	32
5.2.3	Verificação de ocorrência de histerese.....	33
5.3	Determinação da perda de carga	34
5.3.1	Determinação da perda de carga experimental	34
5.3.2	Determinação da perda de carga pela Equação de Ergun	35
5.3.3	Comparação dos métodos de determinação da perda de carga	35
5.4	Cálculo da permeabilidade do leito.....	37
5.4.1	Determinação da permeabilidade através dos dados experimentais	37
5.4.2	Determinação da permeabilidade através da equação de Ergun	38
5.4.3	Comparação dos métodos de determinação de permeabilidade.....	39
5.5	Equação empírica para pressão	40
6	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Devido à larga aplicação na indústria, o tema de escoamento em leitos porosos toma grande visibilidade no âmbito da engenharia. O estudo do comportamento do fluido com o meio, dos fenômenos e das leis que os regem é fundamental para embasar os processos de funcionamento de diversos equipamentos industriais. Na engenharia química são conhecidas as operações unitárias que se utilizam do princípio de escoamento de fluidos em meios porosos, por exemplo, filtração, adsorção, membranas, secagem, aglomeração de pós, revestimento de partículas, aquecimento e resfriamento de sólidos, entre outras (DECHSIRI, 2004).

Os motivos desta grande aplicação são devidos às vantagens do transporte do fluido através do meio. De forma geral, com a percolação do fluido no meio, a área superficial do sólido poroso fica disponível para interação com o fluido e para os fenômenos de transferência de calor e massa, proporcionando um aumento nos coeficientes térmico e de difusão (ISENMANN, 2012). Além disso, a robusta agitação do meio provoca uma mistura de sólidos satisfatória. Desta forma, os equipamentos desempenham os processos com maior eficiência através do contato íntimo entre as fases e com aumento das taxas de transferências de calor e massa.

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).

Os leitos porosos são constituídos de um meio sólido que contém poros, os quais possibilitam a passagem de fluidos (gás ou líquido) através destes espaços vazios de forma aleatória. Tais leitos possuem princípio de funcionamento semelhante, porém diferenciam-se quanto aos tipos de regimes e recheios utilizados, implicando assim em variadas empregabilidades (TADINI, 2016).

Ao escoar pelo o meio, o fluido provoca um atrito na superfície sólida em razão da resistência gerada pela sua viscosidade e inércia, ocasionando perda de energia no sistema. A diferença inicial e final da energia do fluido devido aos efeitos adversos de seu movimento denomina-se perda de carga. Com a queda de pressão associada a esta perda de energia,

diversos processos industriais são onerados devido à necessidade de se compensar a energia de movimento perdida através de equipamentos de bombeio e propulsão de fluidos.

Dentro deste contexto, 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. Tais modelos empíricos predizem resultados verossimilhantes àqueles encontrados em equações complexas calculadas com diversos parâmetros e métodos.

Assim, este trabalho propõe o estudo do leito de tipo fixo do módulo de aulas práticas do laboratório de operações unitárias do curso de engenharia química da UFPB com o intuito de estabelecer um modelo matemático empírico baseado no fluxo volumétrico do fluido para a determinação da pressão, conseqüentemente a 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 para pressão de um módulo de leito fixo capaz de prever os valores de queda de pressão do fluido 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 fixo utilizado;
- Determinação da permeabilidade de um leito fixo, através da determinação do coeficiente de permeabilidade;
- Desenvolver uma equação empírica que relacione vazão do fluido e a perda de carga;
- Determinar a perda de carga através de diferentes modelos de equações;
- Analisar a similaridade dos resultados encontrados através de modelo teórico e empírico frente aos obtidos experimentalmente, e;
- Validar modelo empírico para uma determinada faixa de vazões.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Escoamento em meios porosos

Meios porosos são materiais sólidos naturais ou sintéticos (esponjas, algumas rochas e cerâmicas, entre outros) que são constituídos por uma rede de interstícios entre as partes ou partículas de sua composição (FRANÇA, 2000). Por possuir estes espaços vazios, os meios porosos possibilitam a passagem de fluido de maneira natural ou forçada. Do ponto de vista da engenharia, este fenômeno detém de uma ampla gama de possibilidades de aplicações através de seu princípio de transporte.

3.1.1 Leito Fixo

Caracteriza-se leito fixo 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). Ao percolar o meio a baixas velocidades, o fluido penetra os caminhos livres entre as partículas, sendo percebida uma distribuição uniforme pelo leito. Quanto mais se aumenta a vazão do fluido, mais intenso será o valor da velocidade do fluido e por consequência da fricção do fluido na superfície da partícula, bem como em razão da expansão e contração do fluxo do fluido, gera-se uma elevação no gradiente de pressão total ao longo do leito.

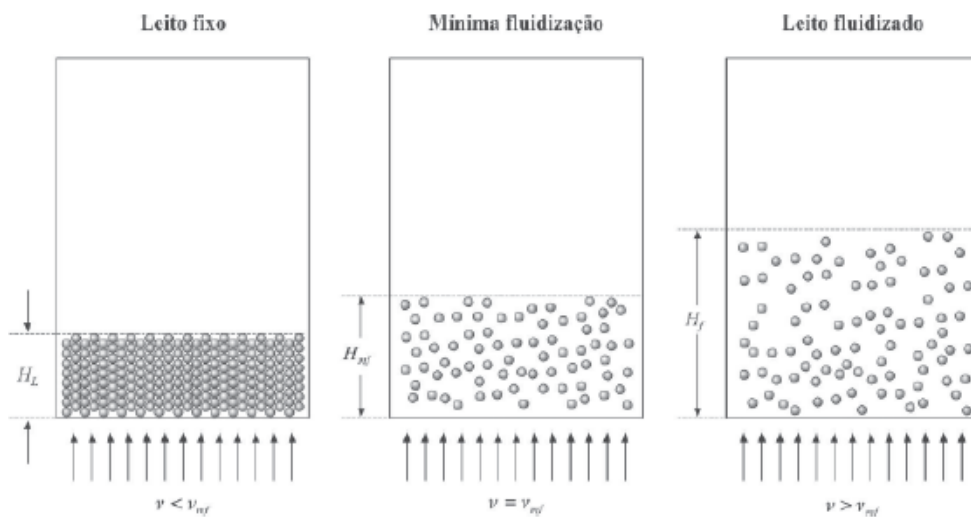
Neste percurso, as substâncias do fluido interagem com vários pontos de contato do meio que transmitem forças friccionais, de adesão e de peso das partículas, podendo ou não ocorrer reação química, adsorção, troca de calor e massa, entre outros fenômenos (YANG, 2003). Portanto, Montillet e Coq (2001) destacam a necessidade de uma caracterização robusta a respeito da estrutura da fase sólida do leito fixo.

Desta forma, eles frisam que para se obter uma modelagem do fluxo otimizada, devem-se conhecer as características de porosidade, tamanho médio de partícula, dimensão média dos poros e geometria dos poros. Para efeitos de simplicidade no cálculo, aplica-se o princípio da semelhança geométrica da partícula a de uma esfera, no intuito de se determinar o arranjo de partículas e, por consequência, os espaços livres.

3.1.2 Leito Fluidizado

Quando a força de atrito entre as partículas sólidas e o fluxo ascendente equilibra o peso do leito, se diz que o leito alcançou o estado de fluidização (velocidade do fluido é igual a velocidade mínima de fluidização) (TADINI, 2016). Ao ser intensificado, o fluxo promove a circulação dos sólidos junto com o fluido, destituindo zonas preferenciais e estagnadas, homogeneizando intimamente o meio, conforme apresenta a Figura 01.

Figura 01: Comportamento de um leito fixo, de um leito no estado de fluidização mínima e um leito fluidizado.



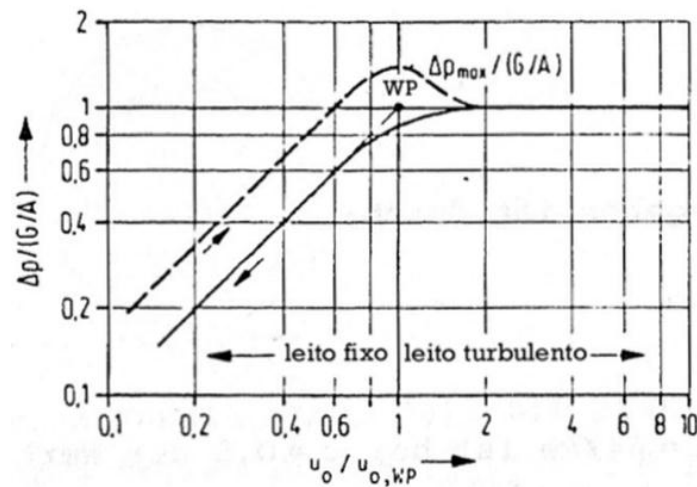
Fonte: TADINI, 2016.

Além disso, quando a velocidade do fluido é superior a velocidade mínima de fluidização, a altura do leito atinge em um determinado momento um nível máximo, no qual o leito se expande e aumenta-se a porosidade, facilitando a passagem do fluido, bem como a queda de pressão permanece constante.

Em determinada velocidade do fluido, este é capaz de suportar o peso das partículas sem arrastá-las junto com o fluido. Neste ponto atinge-se o que denomina-se de fluidização do leito e o valor da velocidade atingida como a velocidade mínima de fluidização do leito.

Esta expansão, marca a transição do regime de fluidização do leito fixo para o leito fluidizado. Neste instante, as partículas sólidas são submetidas a uma condição de bombeio de força que começam a apresentar um comportamento fluido, a este ponto denomina-se ponto de fluidez (do alemão Wirbelpunkt, WP), conforme apresenta a Figura 02.

Figura 02: Processo de fluidização do leito.

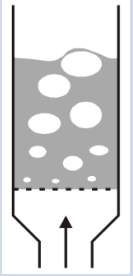
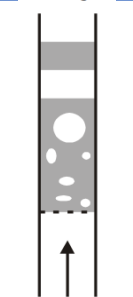
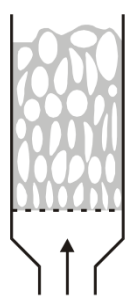
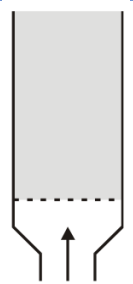


Fonte: Isenmann, 2012.

Diante do processo de escoamento em leitos porosos, podem-se destacar os regimes de fluidização de acordo com a variação da velocidade do fluido no meio, conforme a Tabela 01:

Tabela 01: Resumo dos regimes de fluxos em leitos recheados.

Regime	Ilustração	Descrição
Leito fixo		O fluxo de fluido perpassa o leito de partículas através de caminhos preferenciais, sendo observada por consequência a queda de pressão e energia no sistema. No entanto, o nível do recheio se mantém estável dentro do leito, como outrora em repouso.
Leito Expandido ou Fluidização Mínima		Ao aumentar a velocidade do fluido, atinge-se um ponto mínimo e inicia-se a fluidização, cuja força de arrasto se iguala ao peso das partículas, e a há uma leve expansão do leito em consequência do afastamento das partículas.

Leito Borbulhante		Intensificando-se o fluxo, alcança-se um valor de velocidade na qual a ação dinâmica do fluido permite a reordenação das partículas, de modo a oferecer menor resistência à passagem. Logo, começa a ser observada a formação de bolhas e, por consequência, a variação de pressão no fluido.
Slugging		Com o avanço da velocidade, as bolhas coalescem-se e, a depender da relação entre a altura e o diâmetro do leito, o tamanho das bolhas pode se tornar quase do mesmo tamanho que o diâmetro do leito.
Leito Turbulento		No ponto em que a velocidade do fluido aumenta o suficiente ao ultrapassar a velocidade terminal das partículas, observa-se um movimento turbulento de aglomerados sólidos e vazios de gás de vários tamanhos e formas, fazendo a superfície superior do leito desaparecer. Logo, as quedas de pressão no leito diminuem.
Transporte Pneumático		Se o aumento de velocidade continuar, o leito fluidizado pode ter todo seu material arrastado, com uma fase dispersa, diluída ou pobre, o que equivale ao transporte pneumático de sólidos.

Fonte: Dechsiri, 2004 (adaptado).

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 e granulometria, considerando-se as condições propícias. Assim, devido a essas características a fluidização pode ser classificada de duas formas (MOREIRA, 2012):

- ❖ Fluidização homogênea ou particulada: ocorre entre um sólido e um fluido de massas específicas semelhantes, como os líquidos ou sólidos com grandes partículas, e;

- ❖ Fluidização heterogênea ou agregativa: quando as massas específicas do fluido e do sólido são consideravelmente distintas, como ocorre em leitos com alta velocidade de gases ou as partículas são pequenas.

Os leitos fluidizados são recomendados para aplicação em processos nos quais se demandam altas taxas de transferência de calor e massa, destacando-se importantes empregos em reatores catalíticos e bioreatores, secadores, aglomeração e recobrimento de produtos com pó, congelamento, e em diversas operações unitárias (TADINI, 2016).

De modo geral, o leito fluidizado apresenta como vantagens:

- ❖ Maior área de contato, devido a maior exposição da superfície da partícula com o fluido;
- ❖ Aumento nos coeficientes de transferência de calor e massa em razão da alta mistura (MCCABE, 2005);
- ❖ Grandes velocidades de reação em comparação a leito fixo, em virtude da ausência de gradientes, e;
- ❖ Transferência de calor do leito com parede do equipamento e meio externo favorável.

Algumas desvantagens surgem como o atrito constante e severo das partículas que além de danificar o equipamento com erosão, pode ocasionar a produção de fino particulado, sendo necessária a reposição de matéria prima ou, até mesmo, acoplar ao processo equipamentos de limpeza e retenção de pó, onerando os custos da produção. Além disso, por efeito da mistura constante, o leito fluidizado é essencialmente um tanque de agitação contínua com tempo de residência variando, portanto, a fluidização na prática ainda é uma ciência empírica (YANG, 2003).

3.2 Tipos de recheio

Em equipamentos de processos na indústria química são utilizadas misturas de partículas com diversos tamanhos, as quais constituem um meio pelo qual percolam fluidos (WALAS, 1990). Estas partículas compõem uma estrutura conhecida como recheio e são constituídas, por exemplo, desde sólidos triviais e facilmente acessíveis como areia, arenito, calcário, cascalho, até corpos geométricos complexos e caros, como catalisadores ou internos de torres (FOUST, 2008).

A utilização destes materiais objetiva, de modo geral, entre outros motivos (KISTER, 1992) maximizar a área de superfície por volume, distribuir a área uniformemente e promover a penetração uniforme do fluido ao longo do leito. Para tanto, para cada tipo de aplicação deve ser 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.

3.3 Propriedades do recheio

3.3.1 Esfericidade

Um método usual de exprimir a equivalência da forma de uma partícula a uma determinada forma geométrica é calcular em razão de uma correspondência de similaridade que não depende do tamanho (WALAS, 1990). O parâmetro característico para calcular o grau de aproximação da forma de uma partícula qualquer ao de uma esfera, define-se como esfericidade (ϕ).

A esfericidade pode ser entendida com 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 01.

$$\phi = \frac{\text{Área superficial da esfera de mesmo volume que a partícula} = A_e}{\text{Área superficial da partícula} = A_p} \quad (1)$$

Para uma partícula esférica a esfericidade é igual a um ($\phi = 1$), e para uma partícula não esférica, de qualquer outra forma, o valor da esfericidade varia de zero a um ($0 < \phi < 1$).

Para muitos sólidos particulados a esfericidade é de em torno de 0,6 a 0,8, como mostra a Tabela 02, e para sólidos arredondados por abrasão pode ser superior a 0,95.

Tabela 02: Esfericidade de Materiais

Material	Esfericidade
Areia arredondada	0,83
Pó de carvão	0,73
Areia de sílex	0,65
Vidro quebrado por abrasão	0,65

Fonte: MCCABE, 2005 (adaptado).

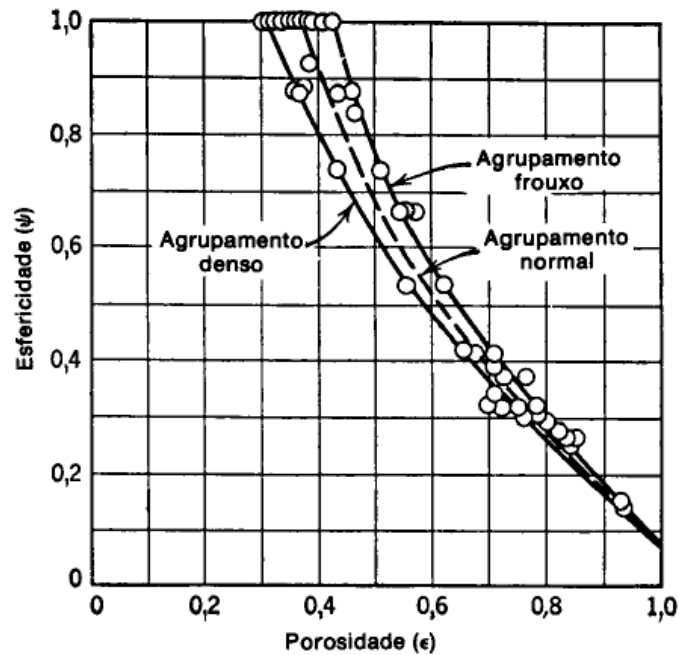
A esfericidade para um leito composto de partículas com diferentes formas pode ser obtida pela média aritmética das esfericidades de cada partícula (YANG, 2003). Para materiais granulares pequenos, é difícil se determinar o exato volume e área superficial da partícula e, para tanto, são utilizados ensaios 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).

3.3.2 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). A porosidade influencia a queda de pressão no escoamento através da fase, influencia a resistividade da fase, a condutividade térmica, a área superficial reativa, e condiciona qualquer propriedade inerente ao conjunto da fase.

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, da dimensão do vaso em relação ao diâmetro da partícula (FOUST, 2008). A forma da partícula é uma variável muito importante e tem influencia inversa na porosidade, ou seja, quanto mais baixa for a esfericidade das partículas do meio, mais aberto será o leito, conforme mostra a Figura 03.

Figura 03: Esfericidade em função da porosidade em leitos preenchidos aleatoriamente com partículas de tamanhos uniformes



Fonte: FOUST, 2008.

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 03:

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

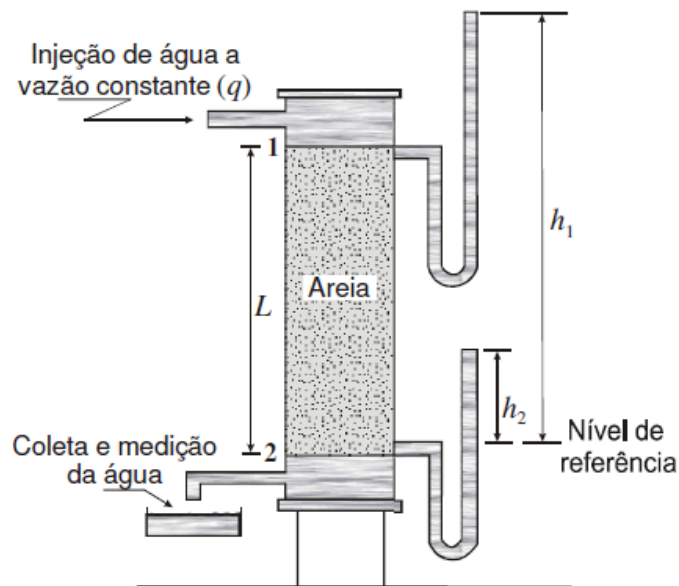
O volume ocupado do leito V_T é a soma do volume ocupado pelas partículas (V_S) e o volume de vazios entre elas (V_v), ou seja, $V_T = V_S + V_v$. Desta forma, a porosidade também pode ser calculada pela substituição deste termo na Equação 03 e tem-se o rearranjo na Equação 04.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_S}{V_T} \quad (4)$$

3.3.3 Permeabilidade (K)

A permeabilidade de um meio poroso é uma medida de sua capacidade de permitir a passagem por fluidos, ou seja, a medida da predisposição de um meio se deixar atravessar por fluidos. Henry Darcy formulou a equação para o estudo do fluxo de fluidos em meios porosos ao estudar problemas de tratamento de purificação de água através de filtros de areia, como apresenta a Figura 04.

Figura 04: Esquema do experimento de Henry Darcy



Fonte: Rosa, 2006.

Darcy observou que “a vazão (Q) através de um meio poroso é proporcional à área transversal aberta ao fluxo (A) e ao diferencial de pressão (ΔP), e inversamente proporcional ao comprimento do leito poroso (L) e à viscosidade do fluido escoante (μ)”. Assim, a Equação 05, mais conhecida como equação de Darcy, é válida atendendo as condições em que o meio poroso seja homogêneo; o fluxo seja isotérmico, laminar, permanente, e; que o fluido seja incompressível, homogêneo e com viscosidade constante.

$$Q = KA \frac{\Delta P}{\mu \cdot L} \quad (5)$$

A constante de permeabilidade K tem dimensão de área e sua unidade é o Darcy ($1 \text{ D} = 9,87 \times 10^{-12} \text{ m}^2 = 9,87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$), o qual pode ser entendido como sendo a permeabilidade quando um gradiente de pressão de $1 \frac{\text{atm}}{\text{cm}}$ gera uma vazão de $1 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ de um fluido de viscosidade 1 cP , passando por 1 cm^2 de área aberta ao fluxo (MEDEIROS, 2015). A permeabilidade pode ser relacionada com a porosidade (ϵ) e o tamanho das partículas do meio através da correlação de Kozeny-Carman, apresentada na Equação 06.

$$K = \frac{\epsilon^3 \times (d_p \times \phi)^2}{36 \times \beta \times (1 - \epsilon)^2} \quad (6)$$

Em que,

d_p – Diâmetro característico da partícula, em metros (m);

ϕ – Esfericidade da partícula;

β – Fator de forma.

3.4 Perda de Carga

No escoamento em uma tubulação, o fluido atrita nas paredes do tubo encontrando uma resistência, por consequência perde energia. A dissipação de energia do fluido no escoamento, devido aos efeitos adversos de seu movimento, denomina-se perda de carga ou perda de pressão. Em leitos porosos, este fenômeno conta com um fator intensificador no atrito em decorrência da resistência gerada pela sua 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 (Equação 07). A equação de Ergun combina aditivamente os componentes laminar e turbulento da queda de pressão (ECOEDUCACIONAL, 2014). Em regime laminar, o primeiro termo do lado direito passa a ser 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.

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\frac{150 \times \mu \times q \times (1 - \epsilon)^2}{d_p^2 \times \epsilon^3} \right] + \left[\frac{1,75 \times \rho \times q^2 \times (1 - \epsilon)}{d_p \times \epsilon^3} \right] \quad (7)$$

Para particulados não perfeitamente esféricos, o termo do diâmetro médio da Equação de Ergun é corrigido pela esfericidade, como apresenta a Equação 08, tendo vista a estimativa do valor da perda de carga em razão da não uniformidade das partículas (QUARANTA, 2016).

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\frac{150 \times \mu \times q \times (1 - \varepsilon)^2}{(\varphi \times d_p)^2 \times \varepsilon^3} \right] + \left[\frac{1,75 \times \rho \times q^2 \times (1 - \varepsilon)}{\varphi \times d_p \times \varepsilon^3} \right] \quad (8)$$

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição dos acessórios e equipamentos

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:

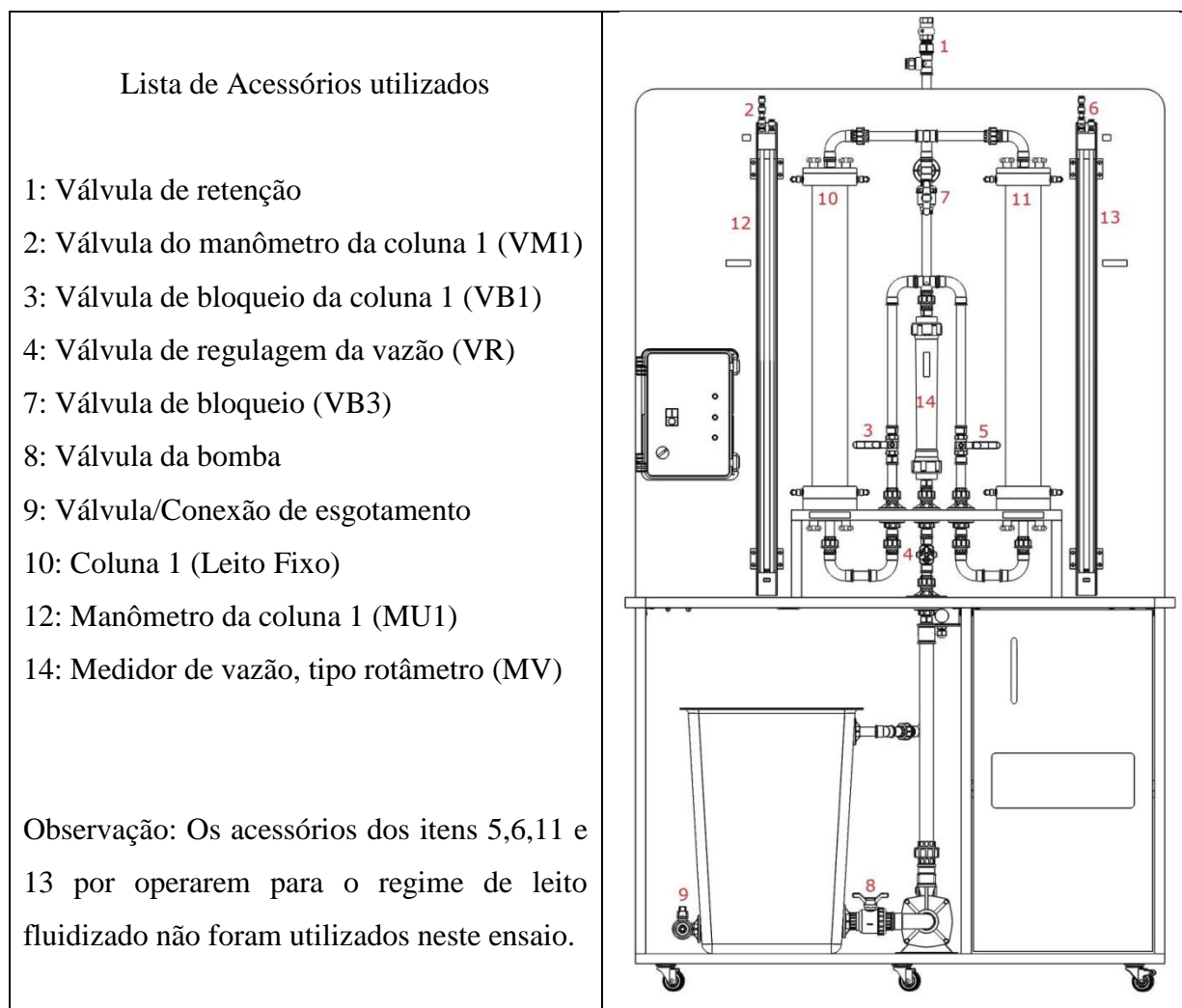
- ❖ Ensaio de porosidade do leito fixo, e;
- ❖ Ensaio de perda de carga.

Visando determinar a porosidade, foi realizado o ensaio de porosidade do leito fixo, no qual foram utilizados os mesmos grãos do recheio, duas provetas (500 mL e 2000 mL) e água, à temperatura ambiente.

Para o ensaio de perda de carga, foi utilizado a Coluna 1 para leito fixo (item 10 da Figura 05) construído pela *Eco Educacional*, 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 2 para leito fluidizado (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, com um montante de 4,65 kg e o fluido de passagem empregado foi água à temperatura ambiente.

Figura 05: Módulo experimental para o Ensaio de perda de carga.



Fonte: EcoEducativa, 2014 (adaptado).

4.2 Descrição dos Experimentos

4.2.1 Ensaio da porosidade do leito fixo

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.

Desta forma, as partículas do recheio são condicionadas até uma determinada altura 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, até o

menisco. Em sequência, verteu-se parte da água da proveta de 500 mL na proveta de 2000 mL até cobrir todas 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. 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 05), e abriu-se apenas a VB1 - válvula de bloqueio da coluna 1 (3) e, em seguida, lentamente, a VR - válvula de regulagem de vazão (4), afim de selar a Coluna 1, a medida que o bombeio expulsa todo o ar de seu interior. Para conclusão do acondicionamento, fecham-se as válvulas VB1 e VR.

Com o módulo devidamente acondicionado (Figura 05), abre-se a VB1 e a VM1 - válvula do monômetro da coluna 1 (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 monômetro 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 05). 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 regulação de vazão (4), a VB1 - de bloqueio da coluna 1 (3) e a VM1 -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 09, como segue:

$$P = (\rho_c - \rho_a)gh \quad (9)$$

Em que,

P – Pressão manométrica (Pa);

h – Altura do clorofórmio no manômetro (m);

ρ_c – Densidade do clorofórmio (kg/m^3);

ρ_a – Densidade da água (kg/m^3);

g – Aceleração da gravidade (m/s^2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades do Leito e do Fluido

5.1.1 Caracterização das partículas

As partículas utilizadas possuíam diâmetros que variavam de 0,00334 a 0,00475 m (Ecoeducacional, 2014). Assim, para a determinação do diâmetro médio destas partículas (d_m), foi calculada a média aritmética entre o diâmetro da menor e da maior partícula, e obtido desta forma o valor de 0,004045 m, como mostra a Equação 10.

$$d_m = \frac{0,00475 - 0,00334}{2} = 0,004045 \text{ m} \quad (10)$$

Além disso, de acordo com a Ecoeducacional (2014), a esfericidade(ϕ) das partículas utilizadas no experimento é de 0,70. Para o caso onde, o valor da esfericidade é igual ou superior a 0,70 e o valor da porosidade (ϵ) se situa entre 0,30 e 0,50, como se enquadra este leito, conforme determinado na secção 5.1.4., assume-se o valor para o fator de forma de 5.

5.1.2 Caracterização da coluna

De acordo com a Ecoeducacional (2014), o valor do diâmetro interno do tubo é de 0,075 m. 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, mediu-se o valor da altura do recheio dentro da coluna, onde se determinou a altura ocupada 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

Duas propriedades do leito são descritas neste item: a porosidade e a permeabilidade. A determinação da porosidade consistiu nos resultados obtidos conforme descrito no item 4.2.1. Assim, com o preenchimento de recheio na proveta de 2.000 mL na altura de 600 mL (V_T), completou-se até a cobertura utilizando 254 mL 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 0,423, como aplicado na Equação 03 e mostrado abaixo na Equação 12.

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

$$\varepsilon = \frac{254 \text{ ml}}{600 \text{ ml}} = \mathbf{0,423} \quad (12)$$

A segunda característica do leito determinada foi a permeabilidade do leito através da equação de Kozeny-Carman (Equação 06). Apesar do cálculo teórico, esta equação utiliza-se de parâmetros internos do leito e das partículas, como o diâmetro das partículas (0,004045 m), a esfericidade (0,7), a porosidade (0,423) e o fator de forma (5), cujos valores foram apresentados anteriormente. Aplicando os valores na Equação 06, tem-se na Equação 13:

$$K = \frac{\varepsilon^3 \times (d_p \times \varphi)^2}{36 \times \beta \times (1 - \varepsilon)^2} \quad (6)$$

$$K = \frac{0,423^3 \times (0,004045 \times 0,7)^2}{36 \times 5 \times (1 - 0,423)^2} = \mathbf{10,18 \times 10^{-9} \text{ m}^2} \quad (13)$$

Desta 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 03.

Tabela 03: Parâmetros de caracterização de partículas, coluna, fluidos e leito.

Caracterização	Legenda	Descrição	Valor	Unidade
Partícula	d_m	Diâmetro médio dos poros	0,004045	m
	φ	Esfericidade	0,70	-
	β	Fator de forma	5	-
Coluna	d_T	Diâmetro do Tubo	0,075	m
	A_T	Área transversal do tubo	0,004418	m
	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)	1,0020E-3	Pa.s
Leito	ε	Porosidade	0,423	-
	K	Permeabilidade de Kozeny-Carman	1,016E-8	m ²

Fonte: Autor, 2018.

5.2 Escoamento em leito fixo

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 escoar 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 04.

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

Tabela 04: Conversão das vazões em fluxos volumétricos.

Vazão (L/min)	Fluxo (m ³ /s.m ²)
2	0,007545
3	0,011318
4	0,015090
5	0,018863
6	0,022635
7	0,026408

Fonte: Autor, 2018.

5.2.2 Determinação da Pressão manométrica

Para a determinação da pressão, foram medidas as alturas das colunas monométricas com clorofórmio (h1, sendo a coluna da esquerda e, h2, a coluna da direita, Figura 05), em seguida somadas. Com base na Equação 09, e levando em consideração a diferença de densidade entre os fluidos da coluna, determinaram-se as pressões manométricas para cada vazão, como mostra a Tabela 05.

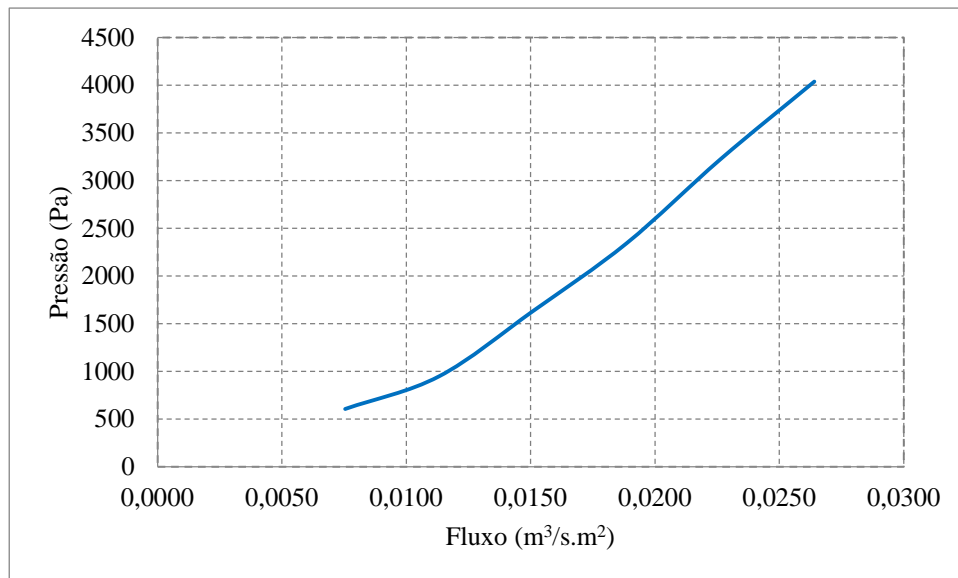
Tabela 05: Pressão manométrica em função do fluxo de água.

Vazão (L/min)	Fluxo (m ³ /s.m ²)	h1 (m)	h2 (m)	Variação (m)	Pressão (Pa)
2	0,007545	0,064	0,062	0,126	606,29
3	0,011318	0,099	0,098	0,197	947,92
4	0,015090	0,171	0,168	0,339	1631,20
5	0,018863	0,244	0,243	0,487	2343,35
6	0,022635	0,337	0,333	0,67	3223,91
7	0,026408	0,422	0,417	0,839	4037,10

Fonte: Autor, 2018.

A partir dos resultados obtidos, os valores da pressão manométrica foram plotados em função do fluxo, como mostra a Figura 06. Observa-se a coerência dos dados através da dependência da pressão em função do fluxo de forma progressiva e crescente.

Figura 06: Gráfico da pressão manométrica em função do fluxo de água.



Fonte: Autor, 2018.

5.2.3 Verificação de ocorrência de histerese

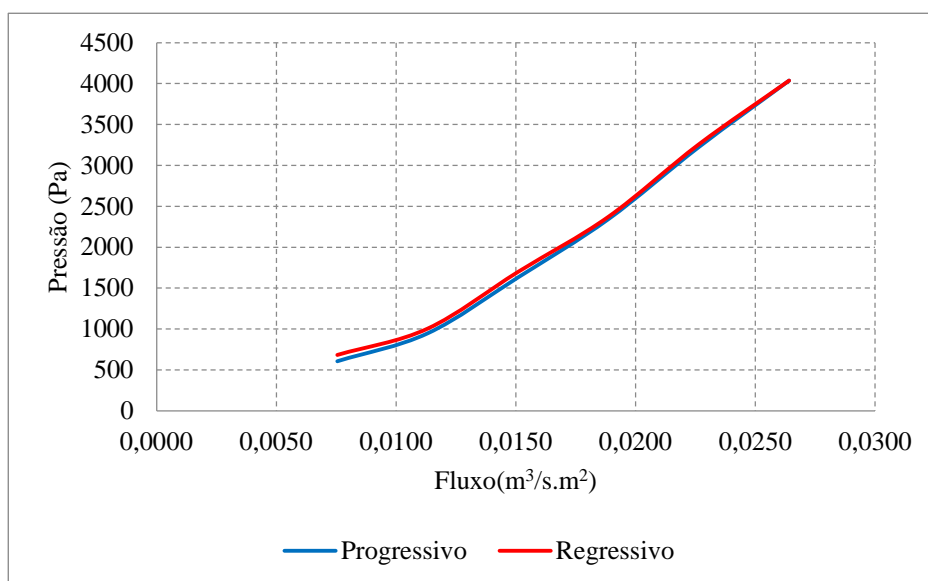
Com o objetivo de analisar a possível expansão do leito, ou seja, ocorrência de histerese, bem como verificar possíveis erros de leitura e medição de dados, novas medidas foram efetuadas. Para tanto, a sequência de medição da pressão em função da vazão foi realizada de forma regressiva, iniciando do 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 09, em função de cada fluxo volumétrico, como apresenta a Tabela 06 e Figura 07.

Tabela 06: Pressão manométrica em função da vazão regressiva de água.

Vazão (L/min)	Fluxo (m³/s.m²)	h1 (m)	h2 (m)	Variação (m)	Pressão (Pa)
7	0,007545	0,422	0,417	0,839	683,28
6	0,011318	0,341	0,336	0,677	1005,67
5	0,015090	0,250	0,243	0,493	1698,57
4	0,018863	0,178	0,175	0,353	2372,22
3	0,022635	0,106	0,103	0,209	3257,59
2	0,026408	0,073	0,069	0,142	4037,10

Fonte: Autor, 2018.

Figura 07: Curvas de pressão manométrica em função do fluxo progressivo e regressivo de água.



Fonte: Autor, 2018.

É possível observar na Figura 07 a sobreposição da linha do fluxo regressivo sobre a linha do fluxo progressivo. Este comportamento é compreendido pela pouca variação das medidas de pressão em função do fluxo e evidencia a pequena histerese do processo, podendo assim ser desprezada.

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 05), sobre o comprimento do tubo ocupado pela coluna de recheio ($L = 0,69\text{m}$ conforme Tabela 03) para cada medida de fluxo. Os valores encontrados de perda de carga são apresentados na Tabela 07.

Tabela 07: Perda de carga calculada experimentalmente em função do fluxo volumétrico.

Vazão (L/min)	Fluxo (m ³ /s.m ²)	$\Delta P/L$ Experimental (Pa/m)
2	0,007545	878,68
3	0,011318	1373,80
4	0,015090	2364,06
5	0,018863	3396,15
6	0,022635	4672,33
7	0,026408	5850,87

Fonte: Autor, 2018.

5.3.2 Determinação da perda de carga pela Equação de Ergun

Com base nos parâmetros de caracterização de partículas, coluna, fluidos e leito, apresentados na Tabela 03, 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 08. Os dados obtidos são mostrados na Tabela 08.

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\frac{150 \times \mu \times q \times (1 - \varepsilon)^2}{(\varphi \times d_p)^2 \times \varepsilon^3} \right] + \left[\frac{1,75 \times \rho \times q^2 \times (1 - \varepsilon)}{\varphi \times d_p \times \varepsilon^3} \right] \quad (8)$$

Tabela 08: Perda de carga calculada pela Equação de Ergun em função do fluxo volumétrico.

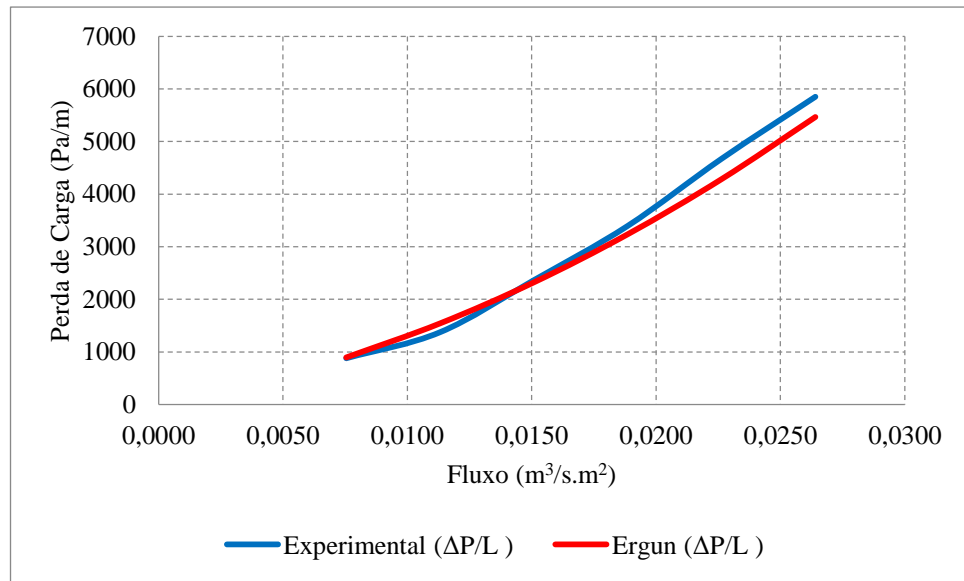
Vazão (L/min)	Fluxo (m ³ /s.m ²)	$\Delta P/L$ Ergun (Pa/m)
2	0,007545	894,34
3	0,011318	1541,69
4	0,015090	2322,49
5	0,018863	3236,75
6	0,022635	4284,46
7	0,026408	5465,63

Fonte: Autor, 2018.

5.3.3 Comparação dos métodos de determinação da perda de carga

A fim de verificar a os dados obtidos pelos dois métodos, os valores de perda de carga obtidos nas seções 5.3.1. e 5.3.2. foram plotados no mesmo gráfico em função do fluxo volumétrico, como mostra a Figura 08.

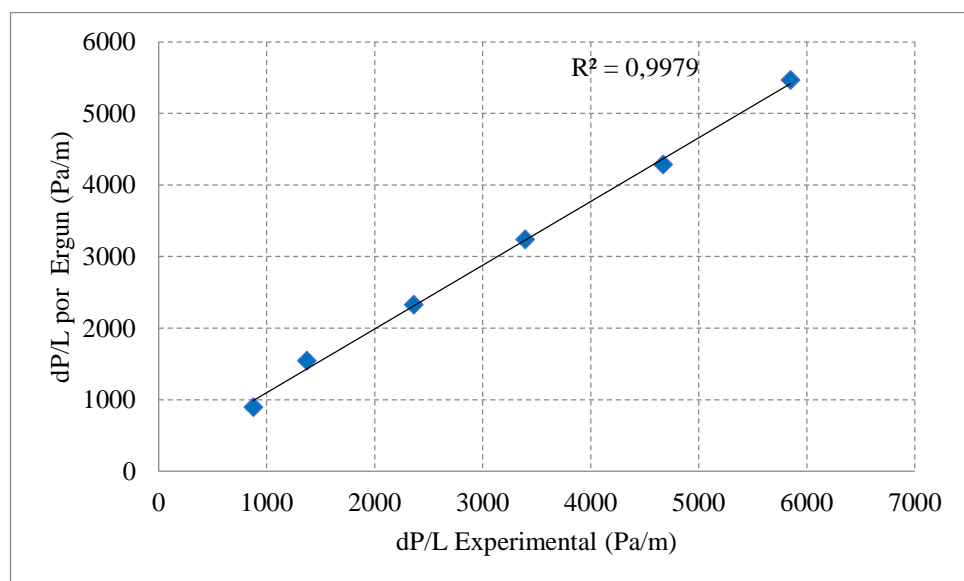
Figura 08: Perda de carga calculada por diferentes métodos.



Fonte: Autor, 2018.

Conforme se verifica na Figura 08, os valores de perda de carga obtidos através da equação de Ergun descrevem o comportamento similar dos dados de perda de carga obtidos experimentalmente. Esta similaridade também pode ser percebida quando os valores de perda de carga são plotados no mesmo gráfico, como mostra a Figura 09, inferindo assim a boa adequação do modelo aos dados experimentais.

Figura 09: Similaridade da perda de carga obtida pela equação de Ergun e dados experimentais.



Fonte: Autor, 2018.

5.4 Cálculo da permeabilidade do leito

A permeabilidade do leito estudado nos experimentos deste trabalho foi obtida de três maneiras distintas, são elas:

- Equação de Darcy com Perda de carga dos dados experimentais;
- Equação de Darcy com Perda de carga da equação de Ergun, e;
- Equação de permeabilidade de Kozeny – Carman.

A determinação da permeabilidade através da equação de Kozeny – Carman fora apresentada na seção 5.1.4. *Caracterização do leito*, cujo valor foi mostrado na Equação 13. Os métodos de determinação da permeabilidade pelos valores de perda de carga dados experimentais e pela equação de Ergun são apresentados nas seções a seguir.

5.4.1 Determinação da permeabilidade através dos dados experimentais

Com base nos resultados de perda de carga obtidos pelo o experimento, foram calculadas as permeabilidades para cada medida de fluxo (q) através da equação de Darcy (Equação 05), considerando o valor de viscosidade da água a 20°C de $1,014 \times 10^{-3}$ Pa.s, conforme Tabela 03. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 09 e Figura 10.

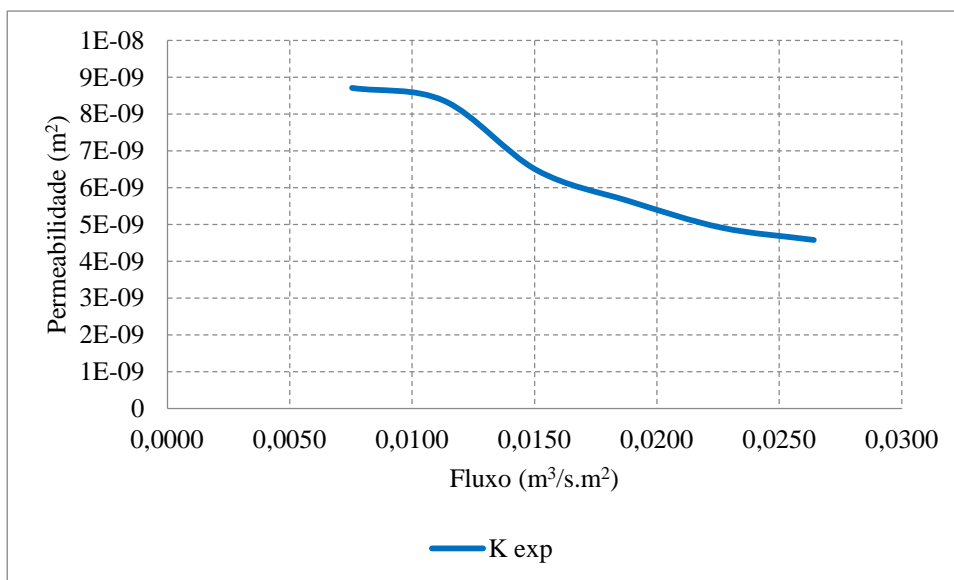
$$K = \frac{q\mu}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)} \quad (5)$$

Tabela 09: Permeabilidade referente a cada fluxo calculada baseada em dados experimentais.

Vazão (L/min)	Fluxo (m ³ /s.m ²)	Permeabilidade (m ²) Experimental
2	0,007545	8,70713E-09
3	0,011318	8,35355E-09
4	0,015090	6,47256E-09
5	0,018863	5,63192E-09
6	0,022635	4,91238E-09
7	0,026408	4,57669E-09

Fonte: Autor, 2018.

Figura 10: Gráfico da permeabilidade obtida experimentalmente versus o fluxo volumétrico.



Fonte: Autor, 2018.

5.4.2 Determinação da permeabilidade através da equação de Ergun

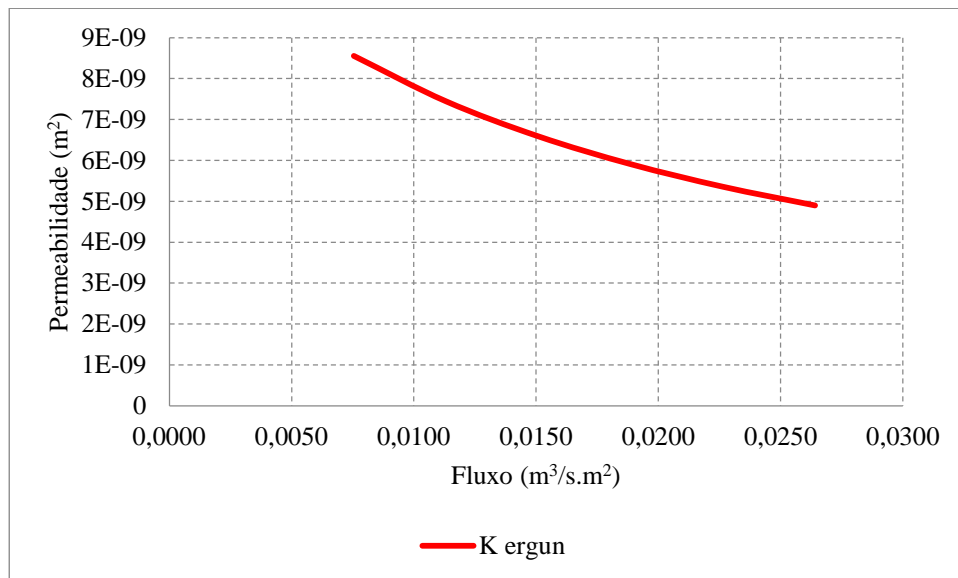
Com os valores de perda de carga $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)$ obtidos através do cálculo da seção 5.3.2. *Determinação da perda de carga pela Equação de Ergun*, a permeabilidade foi calculada através da equação de Darcy (Equação 05), considerando o valor de viscosidade da água a 20°C de $1,014 \times 10^{-3}$ Pa.s, conforme Tabela 03. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 10 e Figura 11.

Tabela 10: Permeabilidade referente a cada fluxo calculada baseada na perda de carga calculada pela equação de Ergun.

Vazão (L/min)	Fluxo (m³/s.m²)	Permeabilidade (m²) Ergun
2	0,007545	8,55466E-09
3	0,011318	7,44388E-09
4	0,015090	6,5884E-09
5	0,018863	5,90929E-09
6	0,022635	5,35709E-09
7	0,026408	4,89928E-09

Fonte: Autor, 2018.

Figura 11: Gráfico da permeabilidade obtida pela perda de carga calculada pela Equação de Ergun versus o fluxo volumétrico.



Fonte: Autor, 2018.

5.4.3 Comparação dos métodos de determinação de permeabilidade

Conforme os valores de permeabilidade calculados através dos dois diferentes métodos das seções anteriores, a Tabela 11 apresenta a variação percentual da permeabilidade a cada ponto de fluxo volumétrico.

Tabela 11: Valores das permeabilidades experimentais e calculadas por Ergun e suas variações percentuais a cada ponto.

Vazão (L/min)	Fluxo (m³/s.m²)	Permeabilidade (m²)		
		Experimental (K)	Ergun (K)	Variação
2	0,007545	8,70713E-09	8,55466E-09	1,78%
3	0,011318	8,35355E-09	7,44388E-09	12,22%
4	0,015090	6,47256E-09	6,5884E-09	-1,76%
5	0,018863	5,63192E-09	5,90929E-09	-4,69%
6	0,022635	4,91238E-09	5,35709E-09	-8,30%
7	0,026408	4,57669E-09	4,89928E-09	-6,58%

Fonte: Autor, 2018.

A permeabilidade, quando comparada ponto a ponto entre os métodos, possuiu uma variação percentual considerável, sendo percebidas flutuações de no mínimo |-1,76%| a |12,22%| no máximo. Apesar das flutuações, ponto a ponto, terem sido consideráveis em

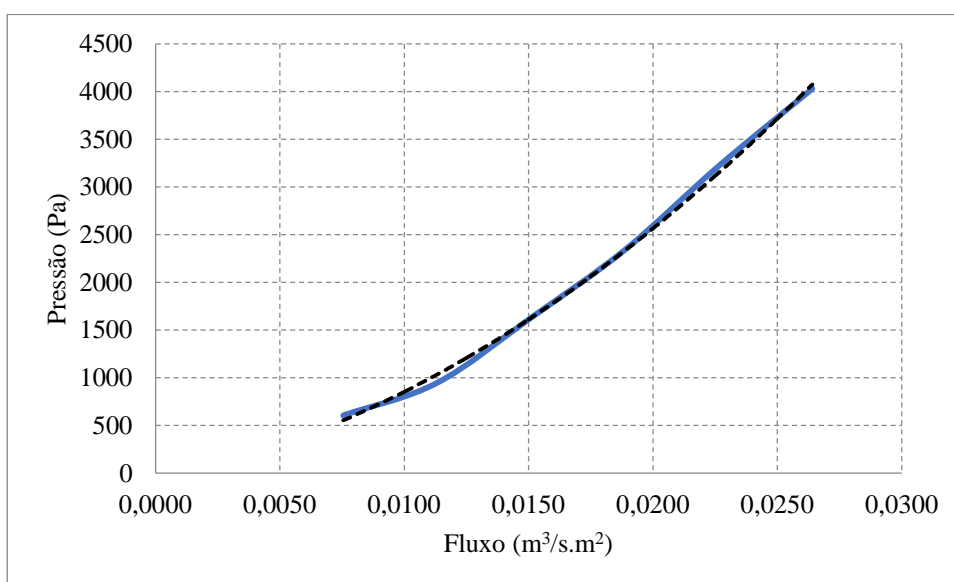
valores percentuais, a ordem de grandeza dos valores foi de 10^{-9} em ambos os métodos, com valores muito próximos. Desta forma, os resultados encontrados corresponderam de forma positiva aos métodos de cálculo.

Além disso, a média dos valores de permeabilidade do método experimental foi de $6,44237 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ frente ao valor de $6,45877 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ para a permeabilidade calculada pela equação teórica. A variação percentual dos valores médios foi de $|1,22\%|$, compreendendo assim que ambos os métodos para a determinação de permeabilidade obtiveram valores satisfatórios.

5.5 Equação empírica para pressão

De acordo com os valores de pressão em função do fluxo volumétrico obtidos experimentalmente no manômetro de clorofórmio e apresentados na Figura 06, pode-se gerar uma equação para prever a tendência do comportamento da pressão em função do fluxo no módulo estudado. Para tal, deve-se gerar uma curva de tendência de valores como mostra a Figura 12.

Figura 12: Ajuste polinomial com curva característica da pressão manométrica em função do fluxo volumétrico



Fonte: Autor, 2018.

Assim, a equação empírica que descreve o comportamento do escoamento do fluido quanto a pressão em função do fluxo aplicado foi gerada através de um ajuste de uma função de polinômio de ordem segunda, com R^2 de 0,998, e está apresentada como a Equação 15.

$$P(q) = 3,948 \times 10^6 q^2 + 52.959,46 q - 69,29 \quad (15)$$

Em que:

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

P: pressão manométrica (Pa).

Com o objetivo de validar a equação, valores de fluxo foram atribuídos na equação empírica. Os resultados foram confrontados com aqueles obtidos experimentalmente, como mostra a Tabela 12.

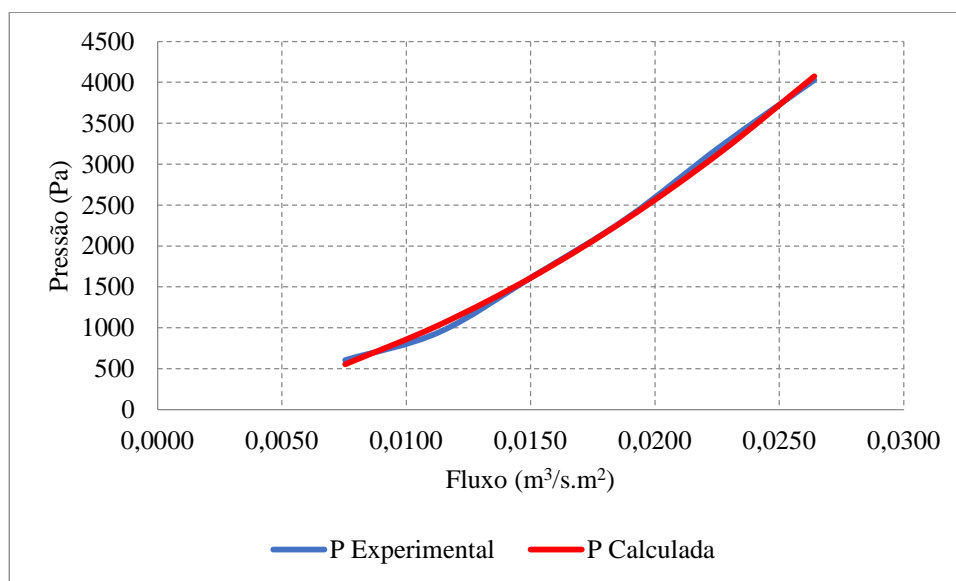
Tabela 12: Valores da pressão obtida experimentalmente e calculada pela equação empírica.

Vazão (L/min)	Fluxo ($\text{m}^3/\text{s.m}^2$)	Pressão (Pa)		
		P Experimental	P Calculada	Variação
2	0,00754512	606,29	553,94	-9,45%
3	0,01131768	947,92	1033,73	8,30%
4	0,01509025	1631,20	1625,68	-0,34%
5	0,01886281	2343,35	2329,79	-0,58%
6	0,02263537	3223,91	3146,06	-2,47%
7	0,02640793	4037,10	4074,50	0,92%

Fonte: Autor, 2018.

Apesar das diferenças percentuais nos valores de pressões calculadas e experimentais variarem de |-9,45%| a |8,30%| ponto a ponto, o comportamento da curva de pressão em função do fluxo apresentou tendência similar, como mostra a Figura 13.

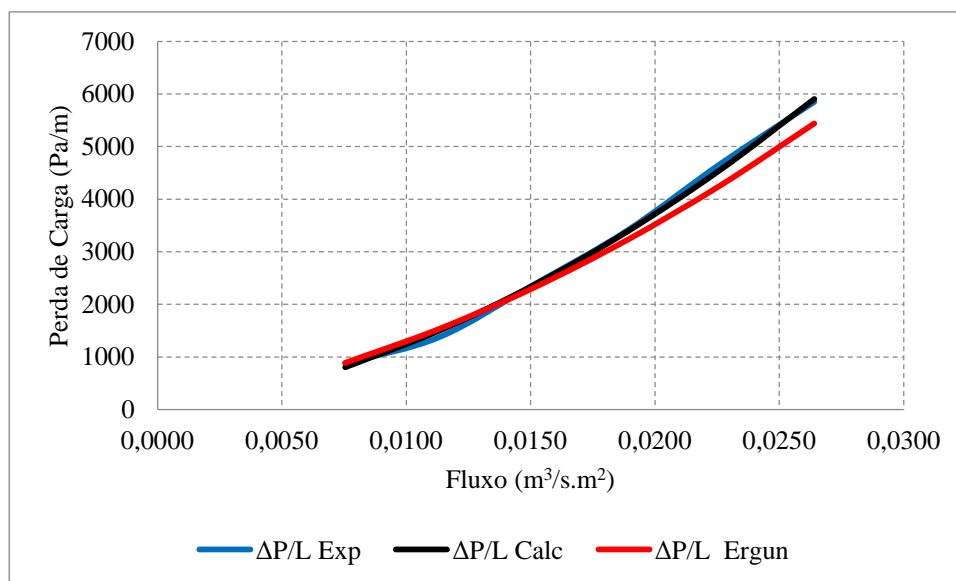
Figura 13: Comparação dos valores de pressão obtidos experimentalmente e pela equação empírica em função do fluxo volumétrico.



Fonte: Autor, 2018.

Além disso, ao se calcular os valores de perda de carga com os dados de pressão pela equação empírica são alcançados valores mais similares aos obtidos experimentalmente frente aqueles calculados pela equação de Ergun, como ilustra a Figura 14.

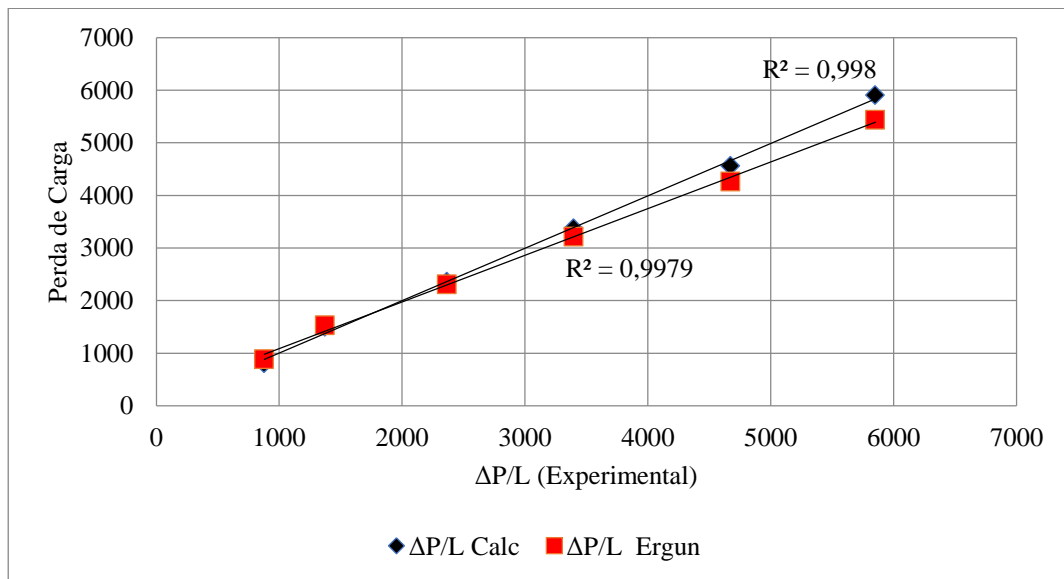
Figura 14: Comparação dos valores de perda de carga por diferentes métodos em função do fluxo volumétrico.



Fonte: Autor, 2018.

A similaridade dos valores de perda de carga calculados pela equação empírica pode também ser percebida maior do que os valores obtidos pela equação de Ergun quando plotados os pontos de $\Delta P/L$ de ambos os métodos frente aos valores experimentais, como mostra a Figura 15.

Figura 15: Comparação dos valores de perda de carga por diferentes métodos em função do fluxo volumétrico.



Fonte: Autor, 2018.

Com isto, se valida a coerência dos dados obtidos através da equação empírica frente aos valores experimentais. O ajuste polinomial se demonstrou satisfatoriamente válido, inclusive com um R^2 de 0,998, sugerindo assim estar mais próximo aos valores reais do que o resultado obtido pela Equação de Ergun, mostrando assim a robustez do modelo gerado.

6 CONCLUSÃO

- 1- Não foi observado o fenômeno da histerese nos dados experimentais obtidos para a perda de carga do sistema estudado.
- 2- A Equação de Ergun representou satisfatoriamente os dados experimentais de perda de carga para o sistema estudado, atendendo, assim, o objetivo de determinar a perda de carga através de diferentes modelos de equações.
- 3- A Equação de Ergun representou satisfatoriamente os dados experimentais de permeabilidade para o sistema estudado atendendo, assim, o objetivo de determinar a porosidade e permeabilidade através do coeficiente de permeabilidade.
- 4- A equação empírica para o cálculo da pressão/perda de carga como função da vazão/fluxo representou adequadamente os dados experimentais, conforme os objetivos deste trabalho, permitindo assim um cálculo rápido e preciso da perda de carga do sistema estudado.

REFERÊNCIAS

- DECHSIRI, C. **Particle transport in fluidized beds: experiments and stochastic models**. University of Groningen, 2004.
- 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.
- FRANÇA, Antônio Carlos. **Escoamento em meios porosos: uma análise teórica e experimental dos efeitos dos esforços capilares provocados por percolação de água em elemento de alvenaria**. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Guaratinguetá – SP, 2000.
- 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.
- ISENMANN, A. F. **Operações unitárias na indústria química / Armin Franz Isenmann**. Timóteo. 2012. 1a Edição.
- KISTER, Henry Z. **Distillation Design**. McGraw-Hill Education, 1992.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 2005.
- MEDEIROS, William Bruno Barbosa. **Estudo da permeabilidade de meios porosos com solução polimérica**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Natal – RN, 2015.
- MONTILLET A., LE COQ L. **Characteristics of fixed beds packed with anisotropic particles**—Use of image analysis, Powder Technology, v. 121, p. 138-148, 2001.
- MOREIRA, M. F. P., **Apostila de Leito Fixo e Leito Fluidizado**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Toledo – PR, 2012.
- NITZ, Marcello (Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia) e GUARDANI, Roberto (Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da USP) – **Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e avanços**- 2015.
- 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.
- ROSA, A. J.; CARVALHO, R.S.; XAVIER, J.A.D. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. 1ª Edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro - RJ, 2006.

TADINI, C.C., TELIS, V.R.N., MEIRELLES, A.J.A., PESSOA FILHO, P.A. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos.** 1 ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2016.

WALAS, Stanley M. **Chemical process equipment: selection and design.** Newton - MA: Butterworth-Heinemann, 1990.

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