



ANÁLISE DE PERDA DE CARGA DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS
CARREGADOS COM PARTÍCULAS

Alex Gomes Sabino de Araújo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Rio de Janeiro

Março de 2019

ANÁLISE DE PERDA DE CARGA DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS
CARREGADOS COM PARTÍCULAS

Alex Gomes Sabino de Araújo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

Prof. Daniel Onofre de Almeida Cruz, D.Sc.

Prof. Átila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

Prof. Paulo Couto, D. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

Araújo, Alex Gomes Sabino de

Análise de perda de carga de escoamentos bifásicos carregados com partículas / Alex Gomes Sabino de Araújo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XII, 75 p.: il ; 29,7 cm.

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 65-68.

1. Construção aparato experimental. 2. Análise perda de carga. 3. Escoamento turbulento líquido-sólido. I. Cruz, Daniel Onofre de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III.

Título

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela força e sabedoria para escrever essa dissertação.

Agradeço aos meus pais por todo suporte que me deram ao longo de todo o mestrado e de toda a vida.

Agradeço a minha esposa Amanda Cecília por sua companhia e por sua força ao longo do mestrado.

Agradeço ao Professor Daniel Onofre de Almeida Cruz pela orientação e paciência no desenvolvimento da presente pesquisa.

Agradeço ao Professor Átila Pantaleão Silva Freire pelos conhecimentos compartilhados.

Agradeço aos Professores integrantes do NIDF por compartilhar parte de seus conhecimentos.

Agradeço a Cecília por compartilhar de seus conhecimentos na parte experimental e teórica.

Agradeço ao Engenheiro Laert Ferreira por todo suporte na instalação e manipulação dos equipamentos eletrônicos e da interface de aquisição de dados.

Agradeço aos técnicos Alexandre, Fabrício, Tiago e Vinicius que ajudaram na construção do aparato experimental.

Agradeço aos alunos de iniciação científica Paulo, Gustavo, Bruno, Felipe, Gabriel, Ricardo, Victor e Vitória, que me ajudaram no desenvolvimento dos experimentos.

Agradeço aos amigos Alessandro, Rodrigo, Adão, Anderson, Daniel, Marcio e William pela companhia ao longo de toda a pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE PERDA DE CARGA DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS CARREGADOS COM PARTÍCULAS

Alex Gomes Sabino de Araújo

Março/2019

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Programa: Engenharia Mecânica

Escoamentos bifásicos carregados com partículas sobre superfícies lisas são de grande interesse para diversas indústrias. Com o avanço da tecnologia e principalmente das indústrias de óleo e gás o interesse pelo correto entendimento do comportamento desse tipo de escoamento no interior de tubulações tem gerado diversas pesquisas.

Assim, no presente trabalho, foi realizada a construção de um aparato experimental formado por tubulações lisas de aço inox de 50,8 mm de diâmetro e com comprimento total de 88 metros, para posterior análise da perda de carga de um escoamento bifásico líquido-sólido, ao longo das mesmas, através de medições realizadas a partir de tomadas de pressão localizadas de 2 em 2 metros ao longo do aparato. Para essas medições foram utilizadas partículas de Carboneto de Silício de 150 μm de diâmetro, três concentrações diferentes variando de 0,45% a 1,4% em massa, além da variação da vazão de líquido. Além disso, realizou-se o desenvolvimento de uma correlação empírica para a análise da velocidade crítica, a qual é a velocidade abaixo da qual as partículas se depositam na parte inferior da tubulação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PRESSURE DROP ANALYSIS OF PARTICLE-LADEN FLOW

Alex Gomes Sabino de Araújo

March/2019

Advisor: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Department: Mechanical Engineering

Particle-laden flows over smooth surfaces are of great interest to many industries. With the technology advancement, especially in the oil and gas industries, the interest in understanding the behavior of this type of flow inside pipes has generated several researches.

Thus, in the present work, the construction of an experimental apparatus formed by smooth stainless steel pipes with a diameter of 50.8 mm and a total length of 88 meters was needed. It was used for later analysis of the load loss of a liquid-solid biphasic flow long the same construction, measurements of the pressure were taken from sockets located every 2 meters along the apparatus. For these measurements were used Silicon Carbide particles of 150 μm in diameter, three different concentrations ranging from 0.45% to 1.4% by mass, in addition to the variation of liquid flow.

An empirical correlation has been developed for critical velocity analysis, which is the speed at which the particles settle to the bottom of the pipeline

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de símbolos	xii
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 A importância dos escoamentos bifásicos	1
1.2 Motivação e Relevância do trabalho	2
1.3 Objetivo	3
1.4 Contribuição	3
1.5 Estrutura do trabalho	4
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Equação do atrito	5
2.2 Classificação dos escoamentos	6
2.3 Trabalhos publicados	7
2.4 Aplicações industriais.....	12
2.5 Padrões de escoamento	13
2.6 Velocidade Crítica	15
Capítulo 3 – Materiais e métodos	17
3.1 Aparato para a avaliação do separador ciclônico	17
3.2 Aparato para a realização dos ensaios de perda de carga	24
3.3 Ensaios com partículas	29
3.3.1 Aparato para a realização da calibração eletrônica e de aquisição de dados experimentais.....	31
3.3.2 Bombas	34
3.3.3 Termômetro	37
3.3.4 Medidor de pressão	38

3.3.5	Medidor de vazão.....	38
3.4	Cálculo de incertezas de medição.....	39
Capítulo 4 – Resultados e Discussões.....		41
4.1	Resultados do aparato de avaliação	41
4.2	Resultados do aparato de testes	42
4.2.1	Resultado experimental versus teórico para perda de carga	43
4.2.2	Relação entre fator de atrito e número de Reynolds para diferentes concentrações.....	49
4.2.3	Relação entre fator de atrito e velocidade do escoamento.....	50
4.2.4	Relação entre velocidade do escoamento e perda de carga	53
4.3	Velocidade Crítica	54
4.4	Padrão de escoamento	61
Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos futuros		62
5.1	Conclusões.....	62
5.2	Trabalhos futuros.....	63
Referências.....		65
Apêndice A		69

Lista de Figuras

Figura 3.1: Esquemático do aparato de avaliação	19
Figura 3.2: Separador ciclônico.....	19
Figura 3.3: Carbetto de silício malha 100.....	20
Figura 3.4: Bomba de injeção da mistura modelo NEMO NM045BY01L07V	20
Figura 3.5: Aparato para suportar o misturador, com o motor e o hélice.....	21
Figura 3.6: Medidor de vazão Incontrol, modelo PRO 1000	22
Figura 3.7: Tanques de coleta de partículas, juntamente com o separador ciclônico.....	23
Figura 3.8: Balança para pesagem das partículas	24
Figura 3.9: Esquemático do circuito de testes	26
Figura 3.10: Esquemático do circuito de testes	27
Figura 3.11: Aparatos para o posicionamento do injetor de areia e do tanque de mistura	28
Figura 3.12: Tanques de suprimento de água.....	30
Figura 3.13: Aparato para a realização da calibração.....	32
Figura 3.14: Sistema de aquisição de dados	33
Figura 3.15: Equipamento de calibração eletrônica gerador de correntes.....	33
Figura 3.16: Bomba centrífuga de abastecimento do tanque de mistura.....	34
Figura 3.17: Bombas de suprimento de líquido e de retorno do tanque de captação	36
Figura 3.18: Bomba da água de retorno	37
Figura 3.19: Termômetro modelo KT3000	37
Figura 3.20: Medidor de pressão DeltaBar S, range 0 a 500 mbar.....	38
Figura 3.21: Medidor de vazão eletromagnético Incontrol Pro 1000.....	39
Figura 4.1: Resultado obtido para ensaio com água.....	44
Figura 4.2: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--) e ensaio com mistura água e partícula (◇,◇).....	45
Figura 4.3: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--), ensaio com água pura (xx) e ensaio com mistura água e partícula (◇,◇)	45
Figura 4.4: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--) e ensaio com mistura água e partícula (◇,◇).....	46
Figura 4.5: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--), ensaio com água pura (xx) e ensaio com mistura água e partícula (◇,◇)	47

Figura 4.6: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--) e ensaio com mistura água e partícula (\diamond, \diamond).....	48
Figura 4.7: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--), ensaio com água pura (xx) e ensaio com mistura água e partícula (\diamond, \diamond).....	48
Figura 4.8:Variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento para concentração média de 0,45% em massa.....	50
Figura 4.9: Variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento para concentração média de 1,0% em massa.....	51
Figura 4.10: Variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento para concentração média de 1,4% em massa.....	52
Figura 4.11: Relação entre perda de carga e velocidade para ensaio com concentração de 0,45% de partículas sólidas	53
Figura 4.12: Relação entre perda de carga e velocidade para ensaio com concentração de 1,0% de partículas sólidas	54
Figura 4.13: Equilíbrio de corpo livre da partícula	55
Figura 4.14:Comparação de resultados obtidos por Oroskar et al (1980) e através da Equação (4.12).....	58
Figura 4.15: Comparação de resultados obtidos por Davies (1987) e através da Equação (4.12)	58
Figura 4.16: Comparação de resultados obtidos por Durand et al (1952) e através da Equação (4.12).....	59
Figura 4.17: Comparação de resultados obtidos por Parzonka et al (1981) e através da Equação (4.12).....	59
Figura 4.18: Comparação entre valores experimentais e aqueles obtidos por equações empíricas.....	60

Lista de tabelas

Tabela 4.1: Eficiência do separador na condição 1	41
Tabela 4.2: Eficiência do separador na condição 2	42
Tabela 4.3: Relação entre fator de atrito e número de Reynolds para as concentrações utilizadas.....	42
Tabela 4.4: Tabela de valores de velocidade crítica.....	57
Tabela A.1: Tabela de dados experimentais resultante dos ensaios com tubo liso para concentração média de 0,45%	70
Tabela A.2: Tabela de dados experimentais resultante dos ensaios com tubo liso para concentração média de 1,0%	71
Tabela A.3: Tabela de dados experimentais resultante dos ensaios com tubo liso para concentração média de 1,4%	72
Tabela A.4: Tabela de dados experimentais com fatores de atrito para concentração de 0,45%.....	73
Tabela A.5: Tabela de dados experimentais com fatores de atrito para concentração de 1,0%.....	74
Tabela A.6: Tabela de dados experimentais com fatores de atrito para concentração de 1,4%.....	75

Lista de símbolos

ϵ	Rugosidade relativa da tubulação, p. 5
D	Diâmetro da tubulação, p. 29
L	Distância entre tomadas de pressão, p. 29
ΔP	Gradiente de pressão, p. 29
f_D	Fator de atrito de Darcy, p. 23
ρ	Densidade do fluido, p. 30
Re	Número de Reynolds, p. 30
ν	Viscosidade cinemática, p. 30
\bar{U}	Velocidade média do escoamento, p. 30
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede, p. 55
\bar{u}'	Componente horizontal da velocidade turbulenta, p.58
\bar{v}'	Componente vertical da velocidade turbulenta, p.58
C_a	Coefficiente de arrasto, p. 58
A_p	Área da partícula, p.59

1.1 A importância dos escoamentos bifásicos

Os escoamentos bifásicos são importantes em diversas atividades indústrias e aparecem em inúmeros fenômenos da natureza. Pode-se citar o processo de exploração dos poços de petróleo no setor de óleo e gás, atividades relacionadas as indústrias químicas, nos processos produtores de energia, indústrias alimentícias e etc... Na natureza a presença de escoamentos bifásicos também ocorrem em rios e mares, em fenômenos atmosféricos e etc. (Hashemi, 2013)

O interesse acadêmico em relação a esse assunto tem aumentado de forma significativa devido a grande necessidade de resolver os problemas relacionados a esses escoamentos em diversas indústrias, além de muitas vezes serem utilizados como forma alternativa de transporte em indústrias de alimentos.

Nas indústrias de óleo e gás é de extrema importância o correto entendimento de escoamentos bifásico e multifásicos, pois os processos de perfuração, produção e transporte de petróleo são realizados através de dutos de grandes extensões, os quais chegam a quilômetros de comprimento. Durante o processo de perfuração e extração do petróleo, juntamente com o óleo, são extraídos gases, água e areia. Além disso, durante o processo de transporte há a presença de pelo menos duas fases distintas, o que caracteriza um escoamento bifásico. (Najmi et al, 2015)

Existem diversos estudos relacionados a escoamentos bifásicos em tubulações horizontais porém, não há um consenso entre os pesquisadores sobre o comportamento de um escoamento sólido-líquido de forma que foram desenvolvidos diversos modelos matemáticos com intuito de prever esse comportamento.

A grande dificuldade imposta aos escoamentos bifásicos líquido-sólido está na complexidade existente nos fenômenos físicos que ocorrem durante o escoamento. Dessa forma, muitos modelos matemáticos são desenvolvidos a partir de dados empíricos.

Com isso, um grande número de universidades tem investido na construção de aparatos experimentais com o intuito de simular fisicamente escoamentos líquido-sólido sob diversas condições e assim desenvolver um modelo matemático que reflita o comportamento observado durante os ensaios.

1.2 Motivação e Relevância do trabalho

A presença de escoamentos bifásicos líquido-sólido em diversos campos da indústria tem chamado a atenção de inúmeros pesquisadores, principalmente quando relacionado ao setor de óleo e gás.

Na indústria de petróleo, a presença destes tipos de escoamentos muitas vezes são os principais responsáveis por diversos problemas, como a erosão em bombas, a redução na produção de petróleo devido à queda de pressão ao longo da linha e o subdimensionamento e/ou superdimensionamento dos equipamentos devido à falta de conhecimento acerca do comportamento hidráulico e etc.

Um dos problemas que ocorre durante o processo de extração de petróleo é a queda de pressão devido a formação de um leito, composto por partículas sólidas, na parte inferior das tubulações horizontais. Esse fato causa uma redução na produção de petróleo e conseqüentemente um prejuízo de milhares a milhões de dólares por dia. (Najmi et al, 2015)

Os estudos relacionados ao escoamento em tubulações de extração de petróleo tem sido um dos maiores desafios enfrentados pelas indústrias e pela área acadêmica. Os pesquisadores vêm tentando entender melhor como se comporta o escoamento dentro dessas tubulações, identificando os fenômenos físicos relacionados ao mesmo e desenvolvendo teorias e formulações matemáticas que possam refletir da forma mais fiel possível as particularidades existentes em cada escoamento.

Dessa forma, muitas pesquisas vêm sendo realizadas acerca de um escoamento específico conhecido como escoamento bifásico líquido-sólido com o objetivo de entender o comportamento do mesmo no interior de tubulações horizontais, ou seja, entender como se comporta, principalmente, a queda de pressão ao longo das tubulações quando há a presença de sólidos dispersos no líquido.

Entretanto, a maior parte dos estudos realizados demonstra que não há um consenso entre os pesquisadores acerca desse comportamento e assim existem na literatura diversos modelos matemáticos que tentam prevê-lo.

Com isso, é necessário desenvolver estudos mais aprofundados sobre o assunto de forma a esclarecer as diversas lacunas existentes e responder aos questionamentos relacionados a este assunto.

1.3 Objetivo

O desenvolvimento do presente trabalho tem como objetivo investigar através de estudos realizados em aparatos experimentais, o comportamento de um escoamento bifásico, o qual é formado por uma fase líquida e outra sólida, variando a vazão e a concentração. Esse comportamento será analisado através da medição da perda de carga no aparato experimental, a qual é obtida por meio de tomadas de pressão instaladas de 2 em 2 metros ao longo de toda a tubulação e lidas diretamente em um medidor de pressão.

Além disso, para a realização do estudo proposto, foi construído um aparato experimental com 88 metros de comprimento e que possui diversos equipamentos ao longo do mesmo, o qual constitui um outro objetivo do trabalho em questão, de forma a simular as condições de escoamento existente nas linhas de extração de petróleo.

1.4 Contribuição

Ao longo dos anos, diversos trabalhos foram propostos com o objetivo de se avaliar a perda de carga em escoamento bifásico do tipo líquido-sólido. Entretanto a maior parte deles foi realizado através de testes desenvolvidos em aparatos experimentais de pequeno comprimento, para altas concentrações de sólido e utilizando partículas como esferas de vidro, cinzas e outras.

No presente trabalho foram realizados experimentos através de um aparato experimental de 88 metros de comprimento, com 17 pontos de tomada de pressão, com baixa concentração de partículas sólidas e com vazões que variaram de 7,0 a 12,0 m³/h. Dessa forma, pode-se avaliar ao longo da pesquisa o comportamento do escoamento e a perda de carga causada pela presença de baixas concentrações de partículas e diferentes vazões de líquido.

Além disso, foi desenvolvido no trabalho em questão uma correlação empírica para a obtenção da velocidade crítica, cuja é considerada por diversos autores a velocidade abaixo da qual as partículas sólidas começam a se depositar na parte inferior da tubulação. Também foram realizadas comparações com dados experimentais e dados obtidos através de correlações empíricas desenvolvidas por outros autores.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho em questão está estruturado da seguinte maneira:

- 1- O primeiro capítulo é referente a uma breve introdução ao tema a ser abordado ao longo do trabalho, a problemática existente relacionada ao assunto que o motivou e que justifica a relevância do mesmo, além do objetivo a ser alcançado ao final da pesquisa.
- 2- O segundo capítulo é referente a revisão bibliográfica, onde são expostos todos os assuntos relevantes ao perfeito entendimento do trabalho.
- 3- O terceiro capítulo expõe os procedimentos experimentais utilizados para o desenvolvimento do trabalho em questão.
- 4- O quarto capítulo expõe os resultados obtidos ao longo da pesquisa, além das discussões pertinentes ao total esclarecimento relativo a questionamentos.
- 5- O quinto capítulo apresenta a conclusão e as propostas e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura acerca dos principais assuntos pertinentes ao trabalho em questão.

2.1 Equação do atrito

Ao longo dos anos diversas equações para o fator de atrito foram desenvolvidas. Para fluidos newtonianos, von Kármán em 1931 e Prandtl em 1933 introduziram equações para o fator de atrito, ambas sendo resultado de suas respectivas teorias de comprimento de mistura, conforme B.Bird e Light-Foot (2002). Assim, foi proposta a seguinte equação generalizada:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A \log_{10} Re\sqrt{f} + C \quad (2.1)$$

Onde A e C foram obtidos a partir de dados experimentais de Nikuradse (1993), resultando assim, para o caso Newtoniano, na seguinte equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 \log_{10} Re\sqrt{f} - 0,4 \quad (2.2)$$

Além dessa equação, várias outras foram desenvolvidas, para escoamentos laminares e turbulentos, de acordo com Peiyi (1983).

Para os tipos de regimes de escoamento temos:

- 1- Fator de atrito para $Re < 2200$: para o regime laminar, a relação é dependente apenas do número de Reynolds.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.3)$$

- 2- Fator de atrito para $4400 < Re < Re_c$: nessa região a relação é dependente do número de Reynolds e da rugosidade relativa (ϵ / D). Essa relação é dada pela equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon / D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.4)$$

A equação acima, para tubos lisos, torna-se:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{Re \sqrt{f}}{2,51} \right) \quad (2.5)$$

Essa equação é chamada de equação de Prandtl. Além dessa equação, existe uma relação simples para tubos lisos chamada equação de Blasius:

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (2.6)$$

Essa equação é utilizada para $Re < 10^5$.

- 3- Fator de atrito para $Re > Re_c$: para regime totalmente turbulento, a relação é dependente apenas da rugosidade relativa (ϵ / D). Essa relação é dada pela equação de Kármán:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{3,7}{\epsilon / D} \right) \quad (2.7)$$

A presença de partículas sólidas no caso de um escoamento bifásico, deve modificar as relações acima descritas, de forma a introduzir os efeitos dos sólidos em parâmetros como a viscosidade.

2.2 Classificação dos escoamentos

A hidrodinâmica é a parte da mecânica dos fluidos que analisa os tipos de escoamentos que podem ocorrer, a qual se baseia nas leis de conservação de massa, da quantidade de movimento e da energia, de acordo com Ruas (2016).

Dessa forma, ainda segundo Ruas (2016), o escoamento pode ser classificado de acordo com a quantidade de fases presentes, podendo assim, ser especificado como monofásico ou multifásico. Dentro dos escoamentos multifásicos estão inclusos os escoamentos bifásico, trifásicos e etc.

O escoamento multifásico é, por exemplo, composto por uma fase contínua, que pode ser um meio líquido ou gasoso, e uma fase em partículas ou dispersa que pode ser partículas sólidas, bolhas de gás ou gotas de óleo, conforme Paiva (2011).

Assim, para Paiva (2011), um escoamento multifásico é um escoamento onde dois ou mais fluidos concorrem simultaneamente no interior, por exemplo, de uma tubulação. Além disso, esses fluidos possuem propriedades diferentes e são imiscíveis, o que acarreta o aparecimento de interfaces. São essas interfaces que definem a presença de fases e não a questão do estado da matéria (sólido, líquido ou gasoso). Com isso, um escoamento bifásico, o qual está incluso na definição de escoamento multifásico, apresenta apenas uma interface e assim, duas fases.

O comportamento físico das interfaces, o qual depende de propriedades físicas da tubulação e das propriedades de transporte das fases, determina o regime ou padrão de escoamento.

2.3 Trabalhos publicados

Na presente seção serão apresentados alguns trabalhos publicados na área de pesquisa de escoamentos bifásicos com partículas.

2.3.1. Análises experimentais

O estudo de escoamentos bifásicos do tipo líquido-sólido, devido a sua extrema importância, tem sido realizado por diversos pesquisadores ao longo dos anos. Todos esses estudos foram realizados com o objetivo de entender como se comporta esse tipo de escoamento, seus padrões, o perfil de velocidade e seus efeitos sobre a perda de carga. Dessa forma, vários trabalhos têm sido publicados enfatizando os efeitos de vários fatores como o tamanho de partícula, a distribuição das partículas e outras características intrínsecas a esse tipo de escoamento. Assim, a seguir, será realizada uma revisão dos trabalhos experimentais publicados por diversos pesquisadores ao longo dos anos.

Ghanta et al (1999), conduziram experimentos em tubos de aço galvanizado de 0,019 m e 0,0254 m. Em cada tubo foram utilizadas partículas de carvão com diâmetro de 276 μm e partículas de minério de cobre de diâmetro de 279 μm . Segundo os autores, o aumento da concentração de partículas sólidas acarreta o aumento do gradiente de pressão, para uma mesma velocidade de suspensão. Ainda de acordo com os mesmos, o

aumento da concentração de partículas sólidas leva a um aumento da quantidade de partículas e assim ocorre um maior atrito entre as partículas e um maior atrito entre as partículas e a parede do tubo, o que resulta em um aumento da queda de pressão. Além disso, a irregularidade das partículas é responsável pela elevação do atrito entre as partículas e entre as partículas e a parede do tubo e conseqüentemente pela elevação da perda de carga do escoamento.

Matousek (2001) apresentou em seu trabalho o gradiente de pressão e o tipo de padrão de escoamento encontrado em seus experimentos. A pesquisa foi realizada em um aparato experimental desenvolvido em laboratório, o qual era composto por tubulações de 150 mm de diâmetro e 65 metros de comprimento, além de possuir partes horizontais, verticais e inclinadas para baixo em 35°. De acordo com o trabalho em questão foram utilizadas partículas de diferentes diâmetros (0.12, 0.37 e 1.85 mm) separadamente, além de misturas dessas partículas. Segundo os dados do autor, pode-se concluir que quanto maior a velocidade maior seria o gradiente hidráulico e dependendo do padrão de escoamento pode-se chegar a valores diferentes do gradiente hidráulico.

Skudarnov et al (2004), conduziram um experimento em tubos de diâmetro interno de 23 mm, utilizando escoamentos com água e partículas sólidas, onde em cada teste era realizada uma combinação entre duas espécies de esferas de vidro que se diferenciavam pelo tamanho da esfera e pela densidade da mesma. Em seu trabalho, o autor realizou o estudo do gradiente de pressão comparando esse gradiente entre as misturas quando se utilizava as partículas combinadas e quando utilizava a mistura com cada tipo de partícula individualmente. Além disso, foi estudado o efeito do tamanho das partículas no gradiente de pressão. De acordo com o autor, chegou-se à conclusão que em baixas velocidades o aumento no tamanho das partículas ocasionou um aumento no gradiente de pressão. Já para altas velocidades houve um menor gradiente de pressão. Ademais, pode-se observar que a curva do gradiente de pressão para as misturas contendo uma combinação das partículas sólidas encontrava-se entre as curvas de gradiente de pressão das misturas que continham apenas um tipo de partícula.

Kaushal et al (2005), realizaram um experimento com escoamento bifásico sólido-líquido em uma tubulação horizontal de diâmetro de 54,9 mm utilizando esferas de vidro de dois tamanhos diferentes (440 μm e 125 μm), além de uma mistura de ambas esferas em igual proporção em massa. A velocidade utilizada foi de até 5 m/s e a concentração foi de até 50% em volume para cada velocidade. O aparato experimental possuía cerca de 22 m de comprimento e era constituído de dois tanques, um de 200 l que era utilizado

para a mistura e outro, que possuía capacidade de 150 l, que era usado para o suprimento de água, além de uma bomba para manter a homogeneidade da mistura. Nesse trabalho, os autores observaram que a perda de carga, ao utilizar uma determinada velocidade e para uma mistura com esferas de vidro de diâmetro de 125 μm , aumentou com o aumento da concentração. Para uma mistura com esferas de vidro de diâmetro de 400 μm , ao utilizar uma determinada velocidade, a perda de carga aumentou com o aumento da concentração, porém com uma taxa de aumento menor em altas velocidades de escoamento. Já a queda de pressão para a mistura contendo ambos tamanhos de esferas é menor para a maior parte das observações quando se utiliza altas concentrações.

Verma et al (2006), realizaram experimentos em tubos de aço de 50 mm de diâmetro. O comprimento total do experimento era de 30 metros. Os ensaios foram realizados na horizontal e as partículas sólidas utilizadas foram de cinzas volantes retiradas de uma usina termelétrica. Para o ensaio em questão a concentração variou de 50 a 65% em peso e o tamanho das partículas variaram entre 3 e 300 μm . Nessa publicação o autor realizou a medição da queda de pressão primeiramente com água pura e posteriormente com a mistura água e partícula. Com isso, pode-se observar que a queda de pressão do escoamento bifásico com partículas sempre maior em relação ao escoamento monofásico, para as partículas utilizadas. Além disso, conclui-se que quanto mais alta a velocidade maior é a perda de carga e quanto maior a concentração maior, também, é a perda de carga. Segundo o autor, esse aumento da perda de carga devido ao aumento da concentração é proveniente do consequente aumento da densidade e viscosidade do fluido ocasionado pela adição das partículas sólidas.

Chandel et al (2010), apresentaram em seus experimentos estudos relacionados ao transporte de cinzas produzidas por usinas termelétricas devido a queima do carvão para a produção de energia. Os testes foram conduzidos em tubos de diâmetro de 42 mm e de comprimento de 50 metros. De acordo com que foi exposto na publicação, o escoamento bifásico era formado por água e cinzas de carvão, as quais eram divididas em dois subtipos: cinzas flutuantes e cinzas de fundo. A proporção adotada pelo autor foi de 4:1, ou seja, 4 porções de cinzas flutuantes para 1 porção de cinzas de fundo, onde foi alcançada uma concentração máxima de 50% em peso de cinzas. No trabalho em questão foi analisado o efeito da velocidade para várias concentrações e conclui-se que com o aumento da velocidade do escoamento, para uma dada concentração, houve um aumento da queda de pressão.

2.3.2. Análises computacionais

Além dos trabalhos publicados na área de análise experimental, diversos outros autores realizaram pesquisas, nas quais puderam analisar o comportamento dos escoamentos bifásicos a partir de simulações realizadas em softwares computacionais. Assim, a seguir, serão explanados alguns desses trabalhos.

Chen et al. (2009), utilizou uma aproximação multifásica Eurliana a qual se baseia na teoria cinética do escoamento de partículas para simular, em uma tubulação horizontal, um escoamento bifásico composto por carvão e água. De acordo com a publicação, para a modelagem de um escoamento bifásico turbulento onde há forte interação entre as partículas, o modelo turbulento $k-\epsilon$ foi incorporado as equações governantes. Primeiramente, validou-se o modelo com dados de gradiente de pressão e concentração obtidos da literatura e posteriormente com dados obtidos pelo próprio autor. Além disso, no trabalho em questão foi analisado numericamente o efeito da velocidade de injeção, da composição das partículas e da injeção total. Assim, chegou-se a alguns importantes resultados acerca das características do escoamento bifásico, como a distribuição da concentração e o gradiente de pressão.

Lahiri et al (2010) desenvolveu uma metodologia que utiliza uma robusta rede neural híbrida artificial, a qual pode oferecer, para problemas de engenharia, uma performance superior. Foi incorporado ao método uma rede neural híbrida artificial e uma técnica de algoritmo genético. Esse algoritmo é aplicado de forma a fazer uma previsão da velocidade crítica do escoamento do tipo sólido-líquido. Dessa forma, ao comparar os resultados obtidos por esse método com dados encontrados na literatura pode-se mostrar que a rede neural desenvolvida melhorou a previsão da velocidade crítica para diversas condições de operação, diferentes diâmetros de tubulação, além de diversas propriedades físicas.

Kaushal et al (2012), realizou uma simulação numérica de um escoamento bifásico sólido-líquido de alta concentração de partículas finas, utilizando o modelo de duas fases Eurliano e de mistura. Nessa simulação foi utilizado um grid tridimensional não-uniforme e de formato hexagonal para discretizar todo o domínio computacional. O modelo computacional foi comparado com dados obtidos pela passagem de um escoamento bifásico água e esferas de vidro de 125 μm em tubulações horizontais de 54,9 mm de diâmetro. A velocidade de escoamento utilizada foi acima de 5 m/s e foram utilizadas quatro concentrações diferentes. No trabalho em questão conclui-se que a

queda de pressão obtida pela análise numérica está de acordo com aquela obtida no trabalho experimental.

Kumar et al (2017), simulou numericamente um escoamento com partículas sólidas em tubulação usando o modelo Eurliano. Nessa simulação foram utilizadas partículas de 440 μm de diâmetro, a concentração utilizada foi acima de 30% e o diâmetro da tubulação utilizada foi de 54,9 mm. Para discretizar o domínio computacional, foi utilizada um grid não uniforme e a técnica de diferenças finitas para um volume de controle é aplicada para resolver as equações governantes. Para obter a solução numérica precisa é utilizado o modelo turbulento RNG $k\text{-}\epsilon$ junto com o modelo ASM, para um escoamento turbulento completamente desenvolvido. Ao se comparar os resultados obtidos pelo modelo numérico e aqueles obtidos experimentalmente por alguns autores pode-se chegar a conclusão que houve uma congruência entre os resultados.

Gopaliya et al (2016), analisou, usando CFD, o escoamento bifásico do tipo sólido-líquido em um aparato experimental composto de tubulação horizontal de 263 mm de diâmetro. Segundo a publicação, foram utilizadas velocidades de escoamento que variam de 3,5 a 4,7 m/s, concentração de partículas entre 9,95 a 34%, além de serem utilizadas partículas de 165, 290 e 550 μm e que possuíam densidade de 2650 kg/m^3 . Com isso, foi possível chegar à conclusão que o gradiente de pressão aumenta com o aumento da concentração, independentemente do tamanho da partícula. Além disso, pode-se mostrar o aumento do fator de atrito com o comprimento da tubulação para ensaios com os três tamanhos de partículas e para diferentes concentrações e diferentes velocidades de escoamento.

Li et al (2018), conduziu uma análise numérica através de um modelo hidrodinâmico multifásico tridimensional, o qual é baseado na teoria cinética de escoamentos com partículas. Com esse modelo, pode-se modelar o escoamento de três tipos de misturas (água e partícula de diâmetro de 0,44 mm, água e partícula de diâmetro de 0,125 mm e água mais uma mistura de partículas de dois tamanhos diferentes e com a mesma fração em massa), através de uma tubulação horizontal de diâmetro de 54,9 mm. Na publicação em questão, foi analisado o efeito das interações das partículas, como a distribuição da concentração de partículas, a velocidade de distribuição, a distribuição de tensão na parede, entre outras, para o escoamento da mistura de partículas de tamanhos diferentes sob diversas condições de escoamento em comparação com o escoamento onde havia a presença de apenas um tipo de partícula sob as mesmas condições. Dessa forma, pode-se concluir que houve diferentes propriedades de transporte e tendência de mudança dessas

propriedades ao variar a concentração de partículas e a velocidade de escoamento nos diferentes tipos de escoamento utilizados. Além disso, uma camada de lubrificação formada por partículas finas próximas a região inferior da tubulação em escoamentos onde há a presença de partículas de tamanhos diferentes afeta a performance das partículas mais grossas, especialmente a baixas velocidades, além de mudar o padrão de escoamento dessas partículas do tipo salto para o tipo leito deslizante o que reduz o consumo de energia em colisões e a queda de pressão.

Além desses trabalhos, diversos outros foram realizados com o intuito de entender o comportamento de um escoamento bifásico sólido-líquido. Autores como Ling (2003), Eesa et al (2009), Hossain (2011), Kaushal (2011), Capecelatro (2013), Nabil (2013), Jiang (2018), Qi (2018), entre outros, realizaram pesquisas relacionadas as características dos escoamentos bifásicos sólido-líquido.

2.4 Aplicações industriais

Os escoamentos multifásicos, mais especificamente os bifásicos, são encontrados em diversas indústrias. A maior parte delas possui, em alguma etapa da produção, a presença de duas fases distintas, sejam elas, água e gás, água e sólido ou gás e sólido, sendo algumas vezes necessário transportar essa mistura, como no caso de rejeitos de mineradoras e em outras é realizada a mistura para realizar o transporte, como no caso do transporte de grãos na indústria alimentícia. Dessa forma, pode-se perceber que na indústria, em geral, esse tipo de escoamento é encontrado em algum momento e por isso serão exibidas a seguir algumas aplicações onde são encontrados alguns dos tipos de escoamento bifásico.

Liu, H. (2003), diz que escoamentos do tipo sólido-líquido têm sido utilizados cada vez mais em diversas áreas que necessitam transportar sólidos. Segundo ele, esse tipo de escoamento tem sido empregado nas indústrias de minérios, de construção civil, de grãos, de lixos industriais e municipais, de materiais radioativos e em outras inúmeras aplicações.

Lu, Bona et al (2007), menciona em seu trabalho a presença de escoamentos bifásicos, durante a obtenção de combustíveis limpos em reatores MIP. Nesse trabalho, o autor simula escoamentos gás-sólido em reatores MIP.

Zhang et al (2005), em seu trabalho, relata a presença de escoamentos trifásicos (líquido, sólido e gás) presente em lamas de um reator após o processo de conversão de carvão e na produção de combustíveis líquidos sintéticos.

Pahk et al (2008), apresenta em seu artigo a vasta utilização dos escoamentos bifásicos, citando a presença deles na indústria alimentícia, de minérios e nas indústrias de polímeros. Segundo o autor, esse tipo de escoamento é utilizado na indústria de polímeros para o transporte dos pellets, que são as matérias-primas para a produção de polímeros.

Barcelos (2015), trata da questão do transporte de resíduos minerais, os quais são de extrema importância para a preservação ambiental. Segundo ele, esses rejeitos são uma mistura de água e particulado, ou seja, são considerados escoamentos bifásicos líquido-sólido que devem ser tratados e se possível reaproveitados.

Guner (2007), expõe a presença do transporte de sementes na indústria alimentícia. De acordo com o autor, diversos tipos de grãos são transportados por meio do transporte pneumático, sendo possível transportar grandes volumes, sendo esse tipo de transporte um escoamento bifásico do tipo gás-sólido.

Ismail et al (2005), apresenta em seu artigo a presença de escoamentos multifásicos, dentro dos quais estão incluídos os escoamentos bifásicos, na indústria de óleo e gás. Segundo ele, durante a extração do petróleo, juntamente com o óleo são retirados dos poços gás, água e areia.

Egolf et al (2005), descreve em seu trabalho o transporte de gelo de rios e lagos congelados de regiões afastadas para regiões povoadas para aplicações domésticas. De acordo com o autor, o transporte era feito através de uma mistura de água e gelo, uma mistura bifásica.

Dessa forma, pode-se concluir que o correto entendimento do comportamento dos escoamentos bifásicos é de extrema importância, pois existem diversas áreas da indústria que utilizam esse tipo de escoamento para realizar seus processos.

2.5 Padrões de escoamento

Os escoamentos bifásicos, onde a fase líquida é a água e a fase dispersa são partículas, podem ser classificados de forma semelhante aos padrões de escoamentos para escoamentos líquido-gás. Alguns autores apresentam os tipos de escoamentos que são encontrados em alguns setores da indústria e os classificam. Determinados escoamentos do tipo sólido-

líquido podem ter influência direta na queda de pressão ao longo do duto, de acordo com Paiva (2011).

Escoamentos do tipo sólido-líquido, onde a fase dispersa são partículas, são propensos a apresentar acúmulo dessas partículas na parte inferior da tubulação ou o não deslocamento na direção do escoamento. Com isso, foram realizadas classificações de escoamentos quando há a presença de deposição ou não de partículas na parte inferior da tubulação, conforme mostrado por Paiva (2011).

Segundo Doron e Barnea (1996), os padrões para escoamentos do tipo sólido-líquido podem ser classificados de três formas distintas, ou seja, há três tipos de padrão de escoamento:

- a) Escoamento totalmente suspenso: nesse padrão as altas taxas de fluxo de mistura fazem com que todas as partículas permaneçam em suspensão. Esse padrão pode ser subdividido em dois sub-padrões:
 - a.1) Pseudohomogeneo: quando as partículas sólidas estão praticamente distribuídas uniformemente ao longo da seção transversal da tubulação. Nesse tipo de escoamento é necessário velocidades de mistura muito altas, o que não acontece na prática.
 - a.2) Heterogêneo: quando há uma variação da concentração na direção perpendicular ao eixo do tubo, onde a maior concentração está na parte inferior da seção transversal da tubulação. Nesse tipo de escoamento, há mais partículas sólidas sendo transportadas em uma região do que na outra, sendo assim mais comumente encontrado na prática.
- b) Escoamento com leito móvel: com baixas taxas de velocidade de mistura as partículas sólidas tendem a se acumular na parte inferior da tubulação, formando assim um leito de partículas aglomeradas. Essa aglomeração de partículas tendem a se mover ao longo da tubulação, em sua parte inferior. Já na parte superior da tubulação há a presença de uma mistura heterogênea.
- c) Escoamento com leito fixo: com a presença de taxas de mistura do escoamento muito baixas há uma inibição do movimento de todas as partículas imersas e consequentemente a formação de um depósito estacionário na parte inferior da tubulação. Logo acima desse depósito, as partículas se movimentam como uma camada móvel separada. Já no restante da tubulação há a presença de uma mistura heterogênea.

Mautosek (2002), em seu trabalho, classificou os escoamentos bifásicos do tipo sólido-líquido segundo quatro padrões, levando em consideração o tipo de atrito existente:

- a) Escoamento totalmente estratificado: segundo o autor nesse padrão de escoamento o atrito ocorre entre um depósito móvel e a parede do tubo. Ainda de acordo com o mesmo, esse tipo de padrão é impossível de se alcançar em escoamento horizontais, entretanto em escoamentos que ocorrem em tubos declinados em 35° esse tipo de escoamento ocorre, mesmo em altas velocidades.
- b) Escoamento totalmente suspenso: para esse padrão de escoamento, o trabalho em questão propõe que o atrito ocorre na parede da tubulação de escoamentos verticais. Nesses escoamentos, as partículas estão distribuídas de forma uniforme ao longo da seção transversal da tubulação. Dessa forma, parte das partículas se movem em regiões próximas a parede o que acarreta o surgimento do atrito entre as partículas sólidas e a parede da tubulação.
- c) Escoamento não estratificado: de acordo com a publicação, no escoamento não estratificado ocorre atrito entre as partículas sólidas e a parede da tubulação, além de ser um escoamento no qual há um pequeno gradiente de concentração ao se avaliar a seção transversal da tubulação. Esse tipo de padrão ocorre em escoamentos horizontais que apresentam velocidades elevadas.
- d) Escoamento parcialmente estratificado: para o autor, o escoamento parcialmente estratificado ocorre em escoamentos horizontais de baixa velocidade. Nesse padrão surge um depósito na parte inferior da tubulação chamado de leito. Com isso, há a presença do atrito entre a parede da tubulação e as partículas sólidas.

2.6 Velocidade Crítica

Os escoamentos bifásicos sólido-líquido apresentam alguns obstáculos inerentes as próprias fases que os compõem. Um desses obstáculos está relacionado com a presença de leitos formados pelas partículas sólidas no interior da tubulação, os quais algumas vezes interrompem o escoamento.

Salama (2000), definiu a velocidade crítica como uma velocidade abaixo da qual as partículas sólidas formam um leito na parte inferior da tubulação, ou seja, é a velocidade de transição a partir da qual uma partícula estacionária entra em movimento. Ainda segundo o autor, a presença desses leitos pode bloquear o escoamento de forma total ou parcial, causando assim perdas, por exemplo de produção. No trabalho em questão o

mesmo afirmou que se a quantidade de partículas depositadas for pequena a remoção é facilitada, caso contrário haveria uma grande dificuldade na remoção.

Segundo Dabirian et al (2005), a velocidade crítica depende do tipo de padrão de escoamento e pode ser classificada de duas maneiras:

1. Velocidade crítica de deposição de partículas: é a velocidade abaixo da qual uma partícula que estava inicialmente em movimento se deposite no fundo da tubulação.
2. Velocidade crítica de suspensão de partículas: é a velocidade acima da qual uma partícula que estava depositada no fundo da tubulação é erguida e mantida em suspensão.

Ainda segundo o autor, a diferença dessas velocidades está relacionada com a força coesiva que se forma entre as partículas quando as mesmas formam um leito no fundo da tubulação.

Capítulo 3 – Materiais e métodos

O capítulo a seguir descreverá detalhadamente os procedimentos experimentais utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho, como também os equipamentos com suas devidas características e os métodos para a realização dos cálculos.

3 Aparato experimental

Foram desenvolvidos dois aparatos experimentais com intuito de entender o comportamento de um escoamento bifásico do tipo sólido-líquido em uma tubulação horizontal. Para o correto entendimento, inicialmente foi construído o aparato de avaliação do separador ciclônico e posteriormente foi construído o aparato para a realização dos ensaios de perda de carga. Esse é constituído por tomadas de pressão ao longo da tubulação, as quais servem para realizar medidas de pressão e conseqüentemente análise da queda de pressão. Esse aparato experimental foi construído no NIDF (Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos), o qual se encontra na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

3.1 Aparato para a avaliação do separador ciclônico

Antes de realizar os primeiros testes foi necessária a montagem de um circuito de avaliação para a análise de um separador ciclônico, o qual foi adquirido com a intenção de realizar a separação das partículas sólidas da fase contínua, a qual é formada por água.

Os principais objetivos a serem alcançados no circuito de avaliação foram:

- 1 – Avaliar a eficiência do separador ciclônico quanto a capacidade de separar as partículas sólidas da água;
- 2 – Determinar a fração volumétrica de água que sai pela parte superior do separador e a fração volumétrica que sai pela parte inferior;
- 3 – Verificar se há um aumento da eficiência com o aumento da vazão.

A bancada experimental do circuito de avaliação do separador ciclônico é constituída de um sistema aberto e construída com mangueiras flexíveis de 1” de diâmetro interno e

de comprimento de 2 metros, como pode ser observado na representação esquemática da Figura 3.1.

O sistema é constituído pelos seguintes equipamentos:

- Mangueiras flexíveis de 1” que foram utilizadas para conectar a caixa d’água a bomba de injeção de areia e a bomba aos tanques de separação;
- Uma bomba modelo NEMO NM045BY01L07V fabricante NETZSCH, a qual possui vazão máxima de trabalho de 10 m³/h e vazão mínima de 2,5 m³/h e que foi fabricada de forma a suportar no máximo 10% em volume de partículas, utilizada para a injeção de areia;
- Uma caixa d’água de 310 litros onde foi realizada a mistura água e partículas sólidas;
- Um motor da marca EBERLE de 0,5 CV de potência, no qual foi acoplado um hélice, fabricado no próprio laboratório, que foi utilizado para a realização da homogeneização da mistura;
- Dois inversores de frequência da marca WEG modelos CFW500 e CFW08;
- Dois tanques de aço inox 304 de 150 litros cada, fabricados no próprio laboratório, que foram utilizados para recolher tanto as frações de água como as frações de partículas que saíam pelas extremidades do separador;
- Um separador de areia ciclônico modelo KRS 98 C de 45 mm de diâmetro interno do fabricante AKW, o qual não possuía nenhuma informação sobre sua eficiência;
- Um medidor de vazão do tipo deslocamento positivo da marca INCONTROL modelo PRO 1000 com faixa de medição de 0 a 4 m³/h e certificado de calibração da própria empresa de número V104317;
- Filtros de pano com malhas de 100 mesh para coletar as partículas sólidas que eram separadas.

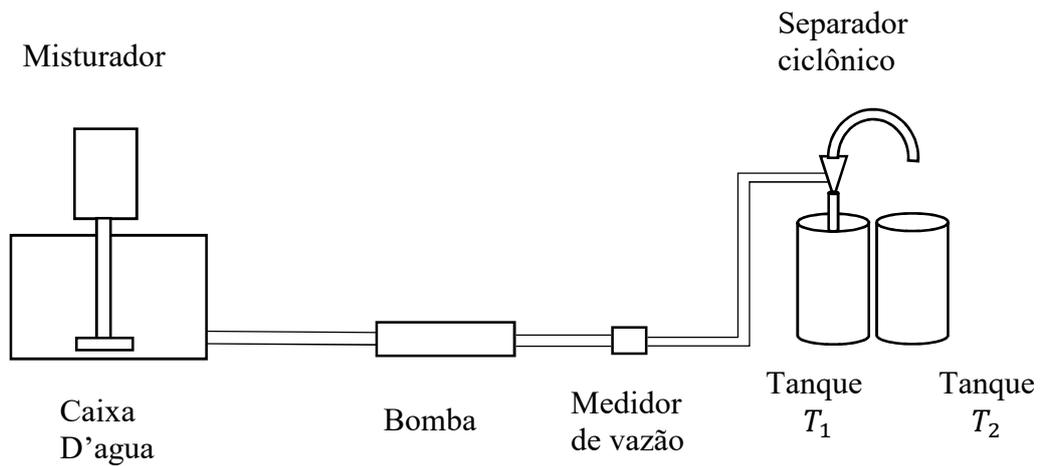


Figura 3.1: Esquema do aparato de avaliação

O ensaio no aparato de avaliação se baseia na necessidade de se obter a eficiência de separação das partículas sólidas da água através de um separador ciclônico, apresentado na Figura 3.2. Esse tipo de separador possui uma entrada lateral por onde entra o fluxo de mistura água e partícula, uma saída superior por onde a maior parte do líquido é retirado e uma saída inferior por onde é retirada a maior parte das partículas.



Figura 3.2: Separador ciclônico

Para a realização da análise da eficiência do separador ciclônico foi utilizada uma mistura água e carbetto de silício, o qual está representado na Figura 3.3. Essa mistura é

formada por 100 litros de água e 2 Kg de carboneto de silício, ou seja, foi utilizado cerca de 2% em volume de partículas sólidas.



Figura 3.3: Carbetto de silício malha 100

No circuito em questão a mistura água e partículas sólidas é bombeada, através da bomba modelo NEMO NM045BY01L07V representada na Figura 3.4, do tanque de mistura, passa pelo medidor de vazão e por último as partículas são separadas no separador ciclônico sendo recolhidas nos tanques.



Figura 3.4: Bomba de injeção da mistura modelo NEMO NM045BY01L07V

Para a realização dos testes no circuito de avaliação, foi necessário obter homogeneização da mistura no tanque de mistura. Para isso, foi construído um aparato para manter o misturador na posição correta e foram testadas diversas combinações de hélices acopladas ao motor do misturador, os quais foram fabricados no laboratório, conforme a Fig. 3.5. Além disso, foram utilizadas diversas frequências no inversor de frequência. Após diversas tentativas e a análise visual pode-se obter uma combinação ideal através da qual se obteve a homogeneização da mistura. Para isso foi utilizada uma frequência de 30 Hz e o hélice foi mantido cerca de 2 cm do fundo do tanque pois era necessário manter todas as partículas em suspensão no líquido.



Figura 3.5: Aparato para suportar o misturador, com o motor e o hélice

Após obter a homogeneização adequada, foi dado início aos testes. Com isso, pode-se entender a necessidade de se obter configurações adequadas para se chegar ao correto

funcionamento do sistema. Assim, observou-se a necessidade de fornecer configurações adequadas ao inversor de frequência da bomba, ou seja, foi imprescindível fornecer um chamado tempo de rampa, onde o inversor levava a bomba do seu estado de repouso ao valor de set de frequência.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas duas vazões, 2,5 m³/h e 4,0 m³/h, as quais foram medidas através do medidor da Incontrol modelo PRO 1000, o qual está representado na Figura 3.6, e foram realizadas 4 repetições para cada vazão, de forma a obter repetitividade.



Figura 3.6: Medidor de vazão Incontrol, modelo PRO 1000

Além disso, para se obter a eficiência do separador foi necessária a coleta das partículas sólidas que eram transportadas pelo fluido tanto pela parte superior como pela parte inferior do separador. Para isso, foram utilizados filtros com malha inferior ao tamanho das partículas, os quais foram colocados na entrada dos tanques de separação, pois foi utilizado um tanque para coletar as partículas que eram arrastadas pela parte superior e outro para coletar aquelas que eram arrastadas pela parte inferior do separador, conforme mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Tanques de coleta de partículas, juntamente com o separador ciclônico

Após a realização do ensaio, os filtros eram removidos dos tanques e as partículas eram coletadas e expostas ao sol para secar.

Ao secar, as partículas sólidas que eram coletadas em ambas partes do separador eram pesadas na balança KNWAAGEN modelo KNCD30/01, conforme a Figura 3.8, a qual possui exatidão de 0,1 g e certificado de calibração, e posteriormente era realizado o cálculo de eficiência.



Figura 3.8: Balança para pesagem das partículas

3.2 Aparato para a realização dos ensaios de perda de carga

Após todos os ensaios realizados no circuito de avaliação, pode-se iniciar os primeiros ensaios no circuito de testes, cujo esquemático é exposto pela Figura 3.9 e pela Figura 3.10.

Os principais objetivos a serem alcançados no circuito de testes foram:

- 1 – Realizar a análise do comportamento da queda de pressão ao longo da tubulação;
- 2 – Analisar a relação entre fator de atrito e velocidade do escoamento;
- 3 – Analisa a relação entre perda de carga e velocidade do escoamento.

Na Figura 3.9 há o esquemático do circuito de testes inicial, mas devido a necessidades operacionais o circuito teve que ser modificado sendo apresentado atualmente como pode-se observar na Figura 3.10.

O circuito de testes é constituído pelos seguintes componentes:

- Uma bomba “NEMO” de 20 m³/h modelo NM076BY02S14V, a qual foi utilizada para bombear a água do tanque para o circuito;
- Uma bomba centrífuga, modelo BC-92S 1C 1T 60, trifásica, de vazão máxima de 9,63 m³/h;
- Uma bomba centrífuga, modelo PRATIKA CP – 4R M PTE, monofásica, potência de ¼ CV, de vazão máxima de 5,0 m³/h
- Três tanques de 1 m³ de aço inox 304, os quais foram utilizados para abrigar o fluido, no caso a água;

- Um tanque de 4 m³, o qual foi utilizado para abrigar o fluido ao final do experimento;
- Um medidor de vazão do tipo eletromagnético do fabricante INCONTROL modelo VMF050C020142040130FK+PRO10412J o qual possui certificado de calibração emitido pelo próprio fabricante sob o número V016417;
- Um medidor de pressão diferencial da ENDRESS + HAUSER modelo DELTABAR S, que mede um diferencial de pressão entre 0 a 500 mbar;
- Um inversor de frequência do fabricante WEG, modelo CFW-11, utilizado para o controle da vazão da bomba;
- 88 metros de tubo rígido de 2” de aço inox 304, sendo 44 metros de ida e 44 metros de retorno;
- Válvula do tipo esfera de 2”, que foram utilizadas para a realização de manobras na linha;
- 19 tomadas de pressão ao longo da linha, as quais foram feitas com engates rápidos e mangueiras de 6 mm de diâmetro;
- Válvulas de fechamento 2/2 vias para mangueira de 6 mm, as quais foram utilizadas para a abertura e fechamento das tomadas de pressão.

Os equipamentos que foram utilizados no circuito de análise foram reutilizados no circuito de testes, ou seja, além dos equipamentos listados acima, foram utilizados aqueles provenientes do circuito de análise.

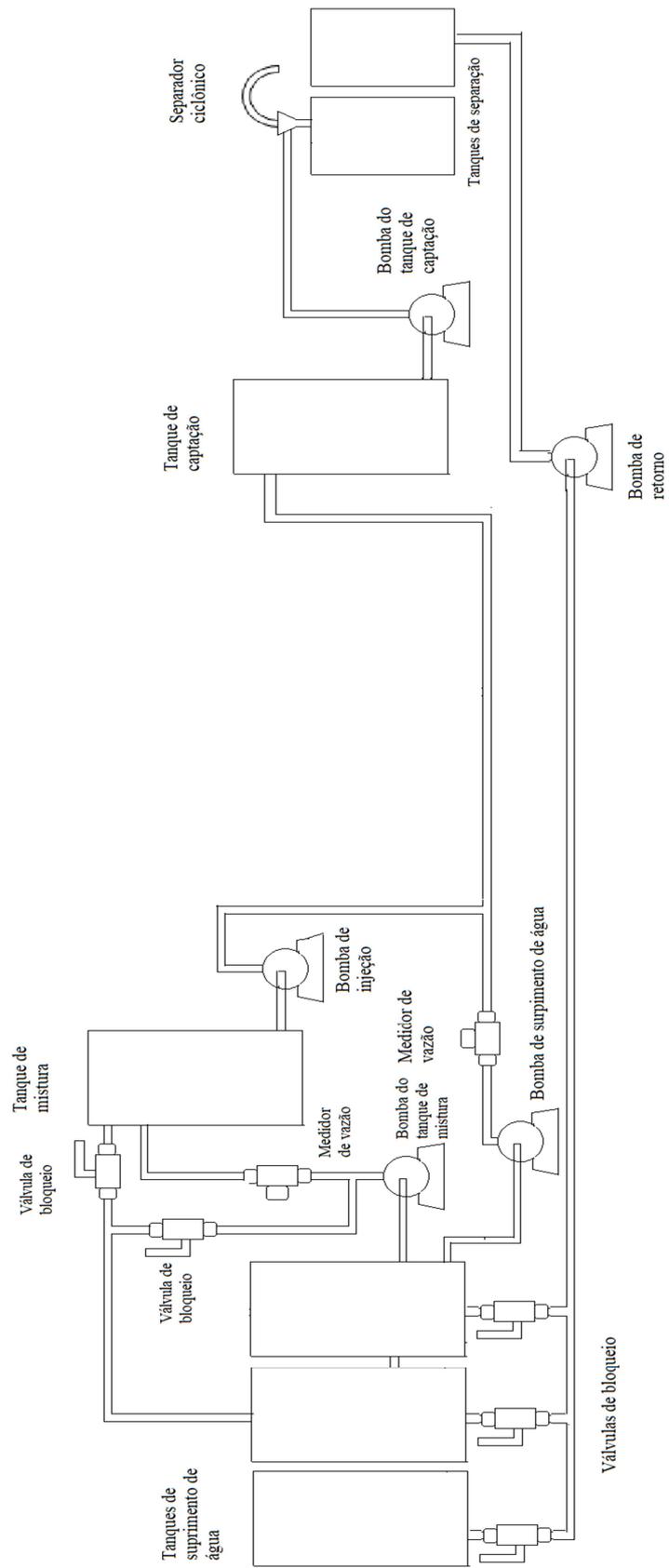


Figura 3.9: Esquemático do circuito de testes

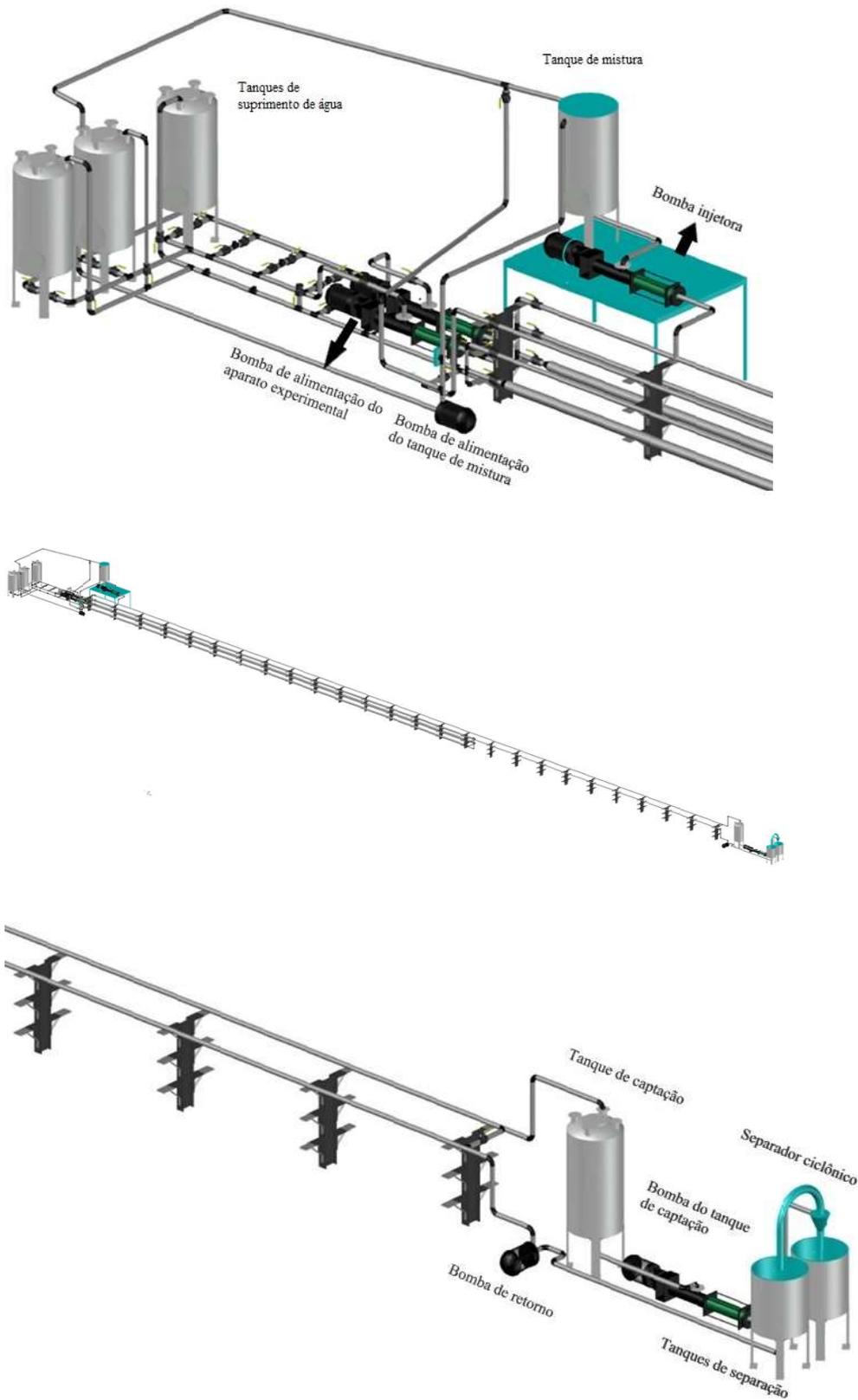


Figura 3.10: Esquemático do circuito de testes

Além dos equipamentos listados foi necessária a construção de dois aparatos para posicionar o injetor de areia e o tanque de mistura em uma posição acima da tubulação onde seria injetada a mistura e um aparato para controlar a vazão de partículas sólidas que foram injetadas no tanque, os quais estão apresentados de acordo com a Figura 3.11.



Figura 3.11: Aparatos para o posicionamento do injetor de areia e do tanque de mistura

Além de tudo, foram utilizados outros equipamentos: para aquisição de temperatura do fluido, para a aquisição de dados e para a calibração eletrônica da placa de aquisição.

- Um termômetro digital tipo espeto modelo KT300 que possui certificado de calibração expedido pelo INMETRO foi utilizado para a aquisição da temperatura do fluido;
- Uma placa da OMEGA modelo OM-USB-1408FS para a aquisição de dados;
- Uma placa de fabricação do próprio laboratório, a qual foi utilizada para obter dados tanto do medidor de vazão como do medidor de pressão;
- Um computador para o tratamento dos dados;

- Um aparato desenvolvido no laboratório, o qual possui uma coluna de água de 1,5 metros de altura foi utilizado para a calibração eletrônica da placa de aquisição;

O circuito de testes foi projetado e construído ao longo da pesquisa e antes de iniciar os ensaios foram feitos testes de estanqueidade para a verificação de vazamentos e os devidos consertos necessários, caso houvesse necessidade. Esses testes foram realizados sob diversas vazões, desde a mínima até a máxima e assim foram verificados e sanados os vazamentos existentes.

Ademais, foram construídas ao longo da tubulação tomadas de pressão, as quais são conectadas a engates rápidos e assim conectadas a mangueiras flexíveis de 6 mm. Essas tomadas são conectadas através das chamadas árvores de pressão. Foram construídas duas árvores, uma de alta pressão com 9 tomadas e uma de baixa pressão com 10 tomadas. Dessas árvores parte uma ramificação, a qual é conectada no medidor de pressão, nas entradas de alta e de baixa pressão respectivamente.

3.3 Ensaios com partículas

Antes de realizar os ensaios com partículas sólidas foi necessária a realização dos ensaios com uma única fase, que no caso é a água, proveniente da rede do Rio de Janeiro, para validar o aparato experimental e verificar a precisão dos cálculos obtidos de fator de atrito da água para tubulação lisa, comparando-se os resultados com aqueles disponíveis na literatura (Blasius, Colebrook). Em cada ensaio mede-se a pressão diferencial em cada tomada de pressão, a partir do escoamento totalmente desenvolvido, verificando assim a linearidade da perda de carga ao longo da tubulação. Após a verificação da linearidade calcula-se o fator de atrito do escoamento através da equação de Darcy-Weisbach (Eq. 3.1).

$$f_D = \frac{2D}{\rho \bar{U}^2} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.1)$$

Onde ΔP é a diferença de pressão, D é o diâmetro interno do tubo, \bar{U} a velocidade média do fluido, calculada a partir da vazão, ρ a massa específica do fluido e L é a distância entre as tomadas de pressão.

O número de Reynolds é calculado, para um fluido newtoniano, pela seguinte equação:

$$Re = \frac{\bar{U}D}{\nu} \quad (3.2)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Após a verificação, pôde-se dar início aos testes com partículas sólidas, onde foram realizados experimentos com concentração média de 0,45%, 1,0% e 1,4% em massa de partículas sólidas.

Para a realização dos ensaios com duas fases é necessário seguir alguns procedimentos que foram adotados ao longo da pesquisa de forma a otimizar os ensaios e evitar erros e falhas.

Inicialmente são feitas anotações no Logbook acerca dos operadores, dia e horário, além da verificação cuidadosa de todas as válvulas que devem estar abertas para o correto funcionamento do sistema e do enchimento dos três tanques de suprimento de água, os quais estão representados na Figura 3.12.



Figura 3.12: Tanques de suprimento de água

Posteriormente, quando necessário, é realizada a calibração eletrônica, a qual tem como objetivo calibrar o valor obtido pelo sistema de aquisição e o valor apresentado pelo medidor de pressão. Para a correta calibração é imprescindível a retirada de ar da coluna de água que é conectada na entrada de alta pressão do medidor de pressão.

Com o sistema inicial, representado na Figura 3.9, após a realização desses procedimentos o sistema era ligado, sendo realizado primeiramente o acionamento da bomba de alimentação do tanque de mistura, em seguida a bomba injetora, posteriormente era acionada a bomba de alimentação do aparato experimental e por último era ligada a bomba de retorno da água livre de partículas sólidas.

Em seguida era realizado o preenchimento do aparato de controle de vazão de partículas sólidas e assim que estivesse tudo pronto liberava-se a vazão do aparato.

Com o sistema atual, representado na Figura 3.10, os procedimentos adotados para o acionamento das bombas permanece o mesmo, porém antes de realizar o preenchimento do aparato de controle de vazão deve-se realizar ajustes na válvula existente em uma das ramificações da saída da bomba de alimentação do tanque de mistura de forma a se obter uma vazão constante de alimentação do tanque de mistura e conseqüentemente uma vazão constante de injeção.

Ao iniciar os ensaios são tomadas medidas da temperatura ambiente e da temperatura inicial da mistura.

Depois de realizar as medições de temperatura, liga-se o sistema de aquisição de dados, realiza-se a manipulação das válvulas de tomada de pressão em cada ponto e a partir do software de aquisição de dados são obtidas as medições de perda de carga.

3.3.1 Aparato para a realização da calibração eletrônica e de aquisição de dados experimentais

A primeira atividade realizada no experimento, após a sua consolidação, foi o desenvolvimento da placa de aquisição de dados e sua adequação ao experimento em si.

Para o correto funcionamento do equipamento de aquisição de dados é necessária a realização da calibração eletrônica, a qual, inicialmente, era realizada utilizando um aparato experimental desenvolvido no laboratório, o qual está representado pela Figura 3.13. O aparato possui uma coluna de água de 1,5 metros, a qual era ligada na tomada de alta pressão do medidor, enquanto a tomada de baixa era mantida aberta para a atmosfera.



Figura 3.13: Aparato para a realização da calibração

Para a realização da calibração era necessária a retirada total de ar existente na coluna de água e no medidor de pressão. Para isso, a ramificação proveniente da árvore de alta pressão era conectada na parte superior da coluna do aparato. O medidor de pressão possui duas saídas utilizadas como drenos, uma para a entrada de alta pressão e uma para a entrada de baixa pressão. Assim, para o preenchimento total da coluna de água e a retirada total de ar da mesma e do medidor, o dreno de alta era aberto e logo em seguida a bomba do sistema era ligada. Com isso, eram realizadas manobras na válvula de bloqueio do dreno para garantir que não havia nenhum ar nem na coluna e nem no medidor.

Finalmente, para se obter a calibração, eram tomadas 45 medidas de diferencial de pressão, as quais eram obtidas abrindo a válvula do dreno, reduzindo assim a coluna de água e ligando o sistema de aquisição de dados, o qual é apresentado pela Figura 3.14.

Como pode-se ver na Figura 3.14 o sistema de aquisição de dados é formado por uma placa de 16 bits da marca Omega, uma placa de aquisição de dados e duas baterias para a alimentação do sistema. A esse sistema são ligados os medidores de pressão e vazão que possuem sinal de saída que segue o protocolo HART, ou seja, possui uma saída em corrente de 4 a 20 mA, as quais representam a menor e a maior pressão que pode ser lida.

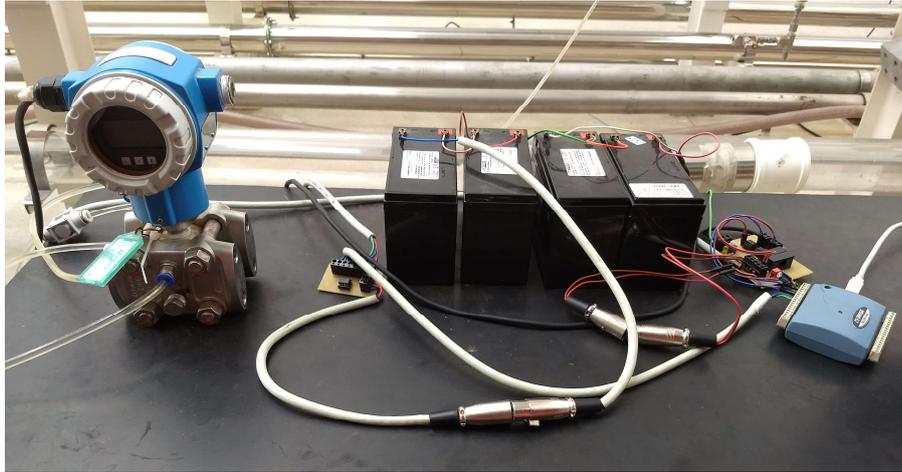


Figura 3.14: Sistema de aquisição de dados

Atualmente, com a aquisição de um equipamento de geração de corrente modelo tal, apresentado na Figura 3.15, a calibração eletrônica é realizada conectando a saída do equipamento gerador de correntes na entrada da placa de aquisição e variando-se a corrente de 0,5 em 0,5 mA iniciando em 4 mA e terminando em 20 mA.

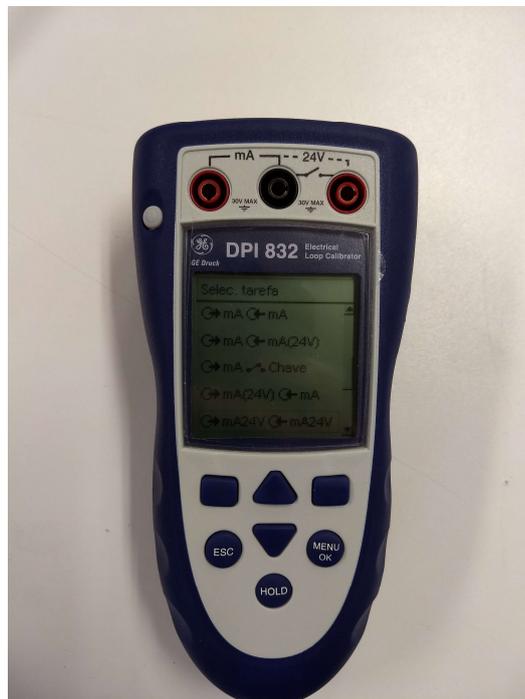


Figura 3.15: Equipamento de calibração eletrônica gerador de correntes

Além disso, é utilizado o Labview, da National Instruments, que é um software utilizado para a aquisição dos dados provenientes do sistema de aquisição. Neste, foi

realizado o desenvolvimento de uma programação, a qual possibilita o acompanhamento dos sinais e a leitura e o armazenamento dos dados, tanto brutos quanto médios, em um arquivo de texto.

3.3.2 Bombas

No trabalho em questão são utilizadas 5 bombas para o correto funcionamento do sistema.

Para o abastecimento do tanque de mistura com água é utilizada uma bomba centrífuga, monofásica, modelo Dancor PRATIKA CP-4R M, $\frac{1}{4}$ CV de potência e vazão máxima de operação de $5 \text{ m}^3/\text{h}$, a qual está representada pela Figura 3.16.



Figura 3.16: Bomba centrífuga de abastecimento do tanque de mistura

Outra bomba, modelo NEMO NM045BY01L07V, é utilizada para a injeção da mistura água e partículas sólidas, a qual foi escolhida por ser volumétrica e com isso possuir um fluxo contínuo sem pulsação, alto rendimento mesmo em baixas velocidades, precisão no controle de fluxo, flexibilidade de montagem e por bombear uma solução de água com partículas sólidas. Essa bomba foi reutilizada do aparato de avaliação e possui as seguintes características, conforme a Figura 3.4:

- Carcaça: Ferro Fundido
- Partes giratórias: AISI 304
- Rotor: AISI 304 cromado especial UM40

- Instalação: Horizontal
- Bocal de sucção: flange 3” ANSI B16.1 – 125 – FF – Vertical
- Bocal de pressão: flange 3” ANSI B16.1 – 125 – FF – Horizontal

E dadas as condições operacionais necessárias ao experimento, a bomba possui as seguintes características:

- Meio para bombear: água + partículas sólidas
- Vazão de projeto: 10,0 m³/h
- Vazão nominal: 10,6 m³/h
- Pressão de descarga: 2,0 bar
- Potência: 1,3 kW
- NPSH requerido: 1,8 mca

Ademais, são utilizadas duas bombas volumétricas modelo NEMO NM076BY01L07V, as quais foram escolhidas devido possuírem a vantagem de ser bombas de fluxo contínuo sem pulsação e que podem trabalhar tanto com água como com óleo. Uma dessas bombas é utilizada para abastecer as tubulações, puxando fluido dos dois tanques de 1 m³ cada e a outra é utilizada puxando a água do tanque de captação da água ao final do experimento. Além disso, possuem as seguintes características, conforme a Figura 3.17:

- Carcaça: Ferro Fundido
- Partes giratórias: AISI 304
- Rotor: AISI 304 cromado especial UM40
- Instalação: Horizontal
- Bocal de sucção: flange 3” ANSI B16.1 – 125 – FF – Vertical
- Bocal de pressão: flange 3” ANSI B16.1 – 125 – FF – Horizontal



Figura 3.17: Bombas de suprimento de líquido e de retorno do tanque de captação

E dadas as condições operacionais necessárias ao experimento, a bomba possui as seguintes características:

- Meio para bombear: água ou óleo
- Vazão de projeto: 20,0 m³/h
- Vazão nominal: 20,0 m³/h
- Pressão de descarga: 10,0 bar
- Potência: 8,7 kW

Finalmente, é utilizada uma bomba para realizar o retorno da água que é captada ao final do ensaio, já livre de partículas sólidas. Essa bomba é centrífuga, modelo BC-92S 1C 1T 60, trifásica e possui vazão máxima de 9,63 m³/h, de acordo com a Figura 3.18.



Figura 3.18: Bomba da água de retorno

3.3.3 Termômetro

Ao início e final de cada experimento são feitas medições de temperatura ambiente e de temperatura do fluido em questão, através de amostras retiradas em uma das tomadas de pressão, com um Termômetro modelo KT300, Figura 3.19, devidamente calibrado. Esse método de medição de temperatura foi devidamente verificado através de testes onde se utilizava banho térmico de temperatura controlada e que apresenta incerteza de $0,2^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.19: Termômetro modelo KT3000

3.3.4 Medidor de pressão

As medidas de pressão tomadas ao longo da tubulação são realizadas utilizando um medidor de pressão diferencial modelo DeltaBar S, o qual possui uma faixa de medição de 0 a 500 mbar, vide Figura 3.20.



Figura 3.20: Medidor de pressão DeltaBar S, range 0 a 500 mbar

Esse medidor é ligado ao sistema de aquisição de dados apresentado na Figura 3.14, através do qual são obtidas as medições de pressão diferencial.

3.3.5 Medidor de vazão

As medidas de vazão tomadas ao longo dos experimentos são realizadas através de dois medidores de vazão. Um desses medidores encontra-se na linha de injeção da mistura, o qual é da marca Incontrol modelo PRO 1000 com faixa de medição de 0 a 4 m³/h, conforme Figura 3.6, e o outro encontra-se na linha de alimentação de água da tubulação. Esse medidor é do tipo eletromagnético do fabricante INCONTROL, modelo VMF050C020142040130FK +PRO10412J, conforme Figura 3.21 e que possui uma faixa de medição de 4 a 45 m³/h.



Figura 3.21: Medidor de vazão eletromagnético Incontrol Pro 1000

3.4 Cálculo de incertezas de medição

Os gráficos apresentados na subseção 4.2.2 a subseção 4.2.4 possuem uma barra de erros relativa as incertezas relacionadas a cada parâmetro que compõe as análises apresentadas, ou seja, para a obtenção do número de Reynolds há uma incerteza, assim como para o fator de atrito, para a velocidade e para a perda de carga.

As incertezas inerentes a cada uma das variáveis foram obtidas a partir de métodos desenvolvidos para a metrologia. De acordo com Mendes (2005), estabeleceu-se, primeiramente, a expressão matemática representativa do processo de medição, depois foram identificadas as correções que deveriam ser aplicadas aos resultados de cada medição nas condições que foram realizadas, avaliou-se as incertezas tipo B, ou seja, as incertezas associadas ao padrão de referência e aquelas associadas ao equipamento de medida ou à calibração, combinou-se as incertezas, calculou-se o grau de liberdade efetivo como também a incerteza padrão combinada e por último a incerteza final.

O número de grau de liberdade efetivo foi calculado através da equação (3.3), que é conhecida como equação de Welch-Satterthwaite.

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \frac{u_3^4}{v_3} + \dots + \frac{u_i^4}{v_i} \quad (3.3)$$

Onde u_c é a incerteza padrão combinada, u_i é a incerteza padrão de cada uma das fontes de incertezas, v_i é o número de grau de liberdade de cada fonte de incerteza e v_{ef} é o número de grau de liberdade efetivo.

Para o cálculo da incerteza padrão combinada foi utilizada a equação (3.4).

$$u_c = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_i^2)} \quad (3.4)$$

Onde u_c é a incerteza combinada.

Já para o cálculo da incerteza final, ou seja, da incerteza expandida, utilizou-se a equação (3.5).

$$U = u_c k \quad (3.5)$$

Onde U é a incerteza expandida e k é o divisor, sendo o fator k inerente ao tipo de distribuição a ser utilizado, sendo elas a normal, quando há um certificado de calibração, retangular para a resolução de leitura dos instrumentos de medição e triangular para a resolução de indicadores analógicos. Para cada uma dessas distribuições há um divisor inerente, o qual é considerado k do certificado, $\sqrt{3}$ e $\sqrt{6}$, respectivamente.

Assim, através do quociente entre a expansão expandida e o valor calculado foi obtida a incerteza em porcentagem.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

4 Resultados alcançados e discussões

Nesse capítulo serão descritos os resultados obtidos ao longo da pesquisa, os quais foram extraídos do aparato de avaliação e do aparato de testes, onde nesse obtiveram-se resultados para o ensaio com uma única fase e para o ensaio com duas fases (partículas sólidas e água).

4.1 Resultados do aparato de avaliação

Conforme dito anteriormente, o aparato de avaliação foi construído com o objetivo de se obter a eficiência do separador ciclônico, o qual é um dos elementos utilizados no aparato de testes para a realização da separação das partículas sólidas.

Para a realização da análise da eficiência do separador ciclônico foi utilizada uma mistura água e carvão de silício. Essa mistura foi formada por 100 litros de água e 2 kg de carboneto de silício, ou seja, foi utilizado cerca de 2% em volume de partículas.

Utilizando uma mistura de 2 kg de carboneto de silício em 100 litros de água, a uma vazão de 2,5 m³/h e uma frequência de 30 Hz no misturador, obtivemos os seguintes dados:

Tabela 4.1: Eficiência do separador na condição 1

Separador de areia ciclônico										
S_1	S_2	R_v	H_1	H_2	M_1	M_2	T	M_t	M_b	% η
133,0g	130,4g	204,4g	5,0cm	32,0cm	123,2g	3,8g	1m 30 s	730,5g	1140,5g	97,0
132,8g	129,8g	204,5g	4,8cm	33,0cm	122,8g	4,1g	1m 30 s	731,2g	1141,3g	96,76
132,6g	129,7g	204,4g	5,0cm	33,5cm	123,3g	3,8g	1m 30 s	730,8g	1140,1g	97,01
132,7g	130,2g	204,4g	5,0cm	32,0cm	123,1g	3,9g	1m 30 s	731,1g	1139,9g	96,92

Para os dados utilizados acima chega-se à conclusão que o rendimento do separador é, em média, de 96,92%.

Já ao utilizar uma mistura de 2 kg de carboneto de silício em 100 litros de água, a uma vazão de 4,0 m³/h e uma frequência de 30 Hz no misturador, obtivemos os seguintes dados:

Tabela 4.2: Eficiência do separador na condição 2

Separador de partículas ciclônico										
S_1	S_2	R_v	H_1	H_2	M_1	M_2	T	M_t	M_b	% η
132,2g	124,0g	203,8g	5,0 cm	35,0cm	577,5g	4,1g	54 s	482,1g	935,3g	99,29
132,4g	123,5g	204,4g	4,7cm	35,1cm	577,7g	4,2g	54 s	480,1g	935,8g	99,27
131,0g	124,2g	204,4g	4,9cm	34,8 cm	577,4g	4,0g	54s	480,3g	936,0g	99,31
130,4g	123,8g	203,7g	4,8cm	34,9cm	577,3g	3,9g	58s	481,4g	935,4g	99,32

Dessa forma, concluímos que em média o separador ciclônico, para as condições apresentadas acima, possui eficiência de 99,30%.

Onde S_1 e S_2 são as massas dos filtros, R_v é a massa do recipiente vazio onde é colocado o carboneto de silício para fazer a pesagem, H_1 e H_2 são as alturas dos níveis de água nos tanques de coleta, M_1 e M_2 são as massas líquidas coletadas respectivamente no tanque T_1 e no tanque T_2 , T é o tempo do experimento, M_t é a massa que permaneceu na caixa d'água, M_b é a massa retida no interior da bomba e % η é a eficiência em porcentagem.

A eficiência do separador ciclônico foi calculada através da seguinte equação:

$$\% \eta = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad (4.1)$$

Onde M_1 é a massa coletada no tanque T_1 e M_2 é a massa coletada no tanque T_2 .

4.2 Resultados do aparato de testes

O aparato de testes foi construído com o objetivo de medir a perda de carga ao longo de toda a tubulação através das tomadas de pressão que foram montadas ao longo do experimento e analisar a relação entre a perda de carga e a velocidade de escoamento, além da relação entre perda de carga e o número de Reynolds, conforme equação (4.2):

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (4.2)$$

Para as medições e análises foi construído o aparato experimental e para o correto entendimento dos resultados foi necessário, durante a construção, determinar o diâmetro interno médio da tubulação. Para isso foi necessário realizar ao menos 4 medições, em direções diferentes, através de um paquímetro e retirar a média aritmética para se chegar ao valor final. Esse valor médio foi utilizado para se obter o valor do número de Reynolds e o valor do fator de atrito experimental.

As perdas de cargas foram obtidas através dos valores lidos diretamente no medidor de pressão diferencial, o qual apresentava valores diferenciais a partir de tomadas de pressão que estão distanciadas entre si por 2 metros.

Dessa forma, foram realizados ensaios ao longo da pesquisa e pode-se chegar a alguns resultados.

4.2.1 Resultado experimental versus teórico para perda de carga

Inicialmente foram feitos ensaios com apenas uma fase, no caso a fase líquida, com o intuito de verificar a validação do experimento. Assim, chegou-se a alguns resultados que serão apresentados a seguir.

Para o ensaio com uma única fase pode-se concluir, através dos resultados obtidos, que o experimento está de acordo com a curva teórica de Blasius, a qual é utilizada para escoamentos em tubos lisos e para escoamentos turbulentos, conforme pode ser visto na Figura 4.1. Para esse ensaio, os pontos representados no gráfico foram tomados em diferentes vazões variando-se desde valores baixos até valores mais altos, obtendo-se assim, dentro do erro estipulado, uma congruência entre os valores teóricos e os experimentais.

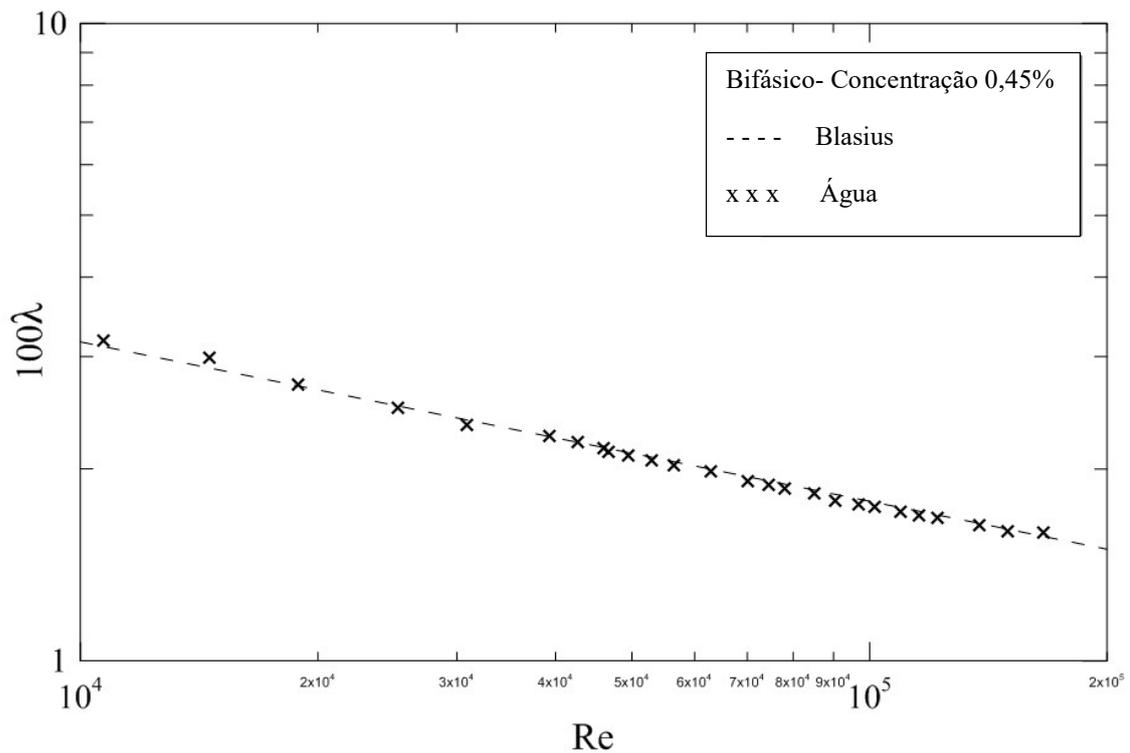


Figura 4.1: Resultado obtido para ensaio com água

Posteriormente foram realizados ensaios com duas fases, no caso água e partículas sólidas. Para esse experimento, foi necessária a construção de um aparato para se obter e viabilizar a vazão de partículas sólidas para o interior do tanque de mistura, além da mudança do aparato experimental, conforme Figuras 3.6 e 3.7.

Para todos os gráficos apresentados na Figura 4.2 a Figura 4.7 os valores máximos de fator de atrito experimental foram obtidos para valores iniciais de concentração, os quais são apresentados na legenda. Com o posterior aumento de vazão há uma redução da concentração e conseqüentemente uma convergência entre os valores de fator de atrito experimental e fator de atrito teórico, representado pela curva de Blasius.

A partir desses ensaios, foi possível, para uma concentração média de 0,45% em massa de partículas, obter resultados, os quais estão representados na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

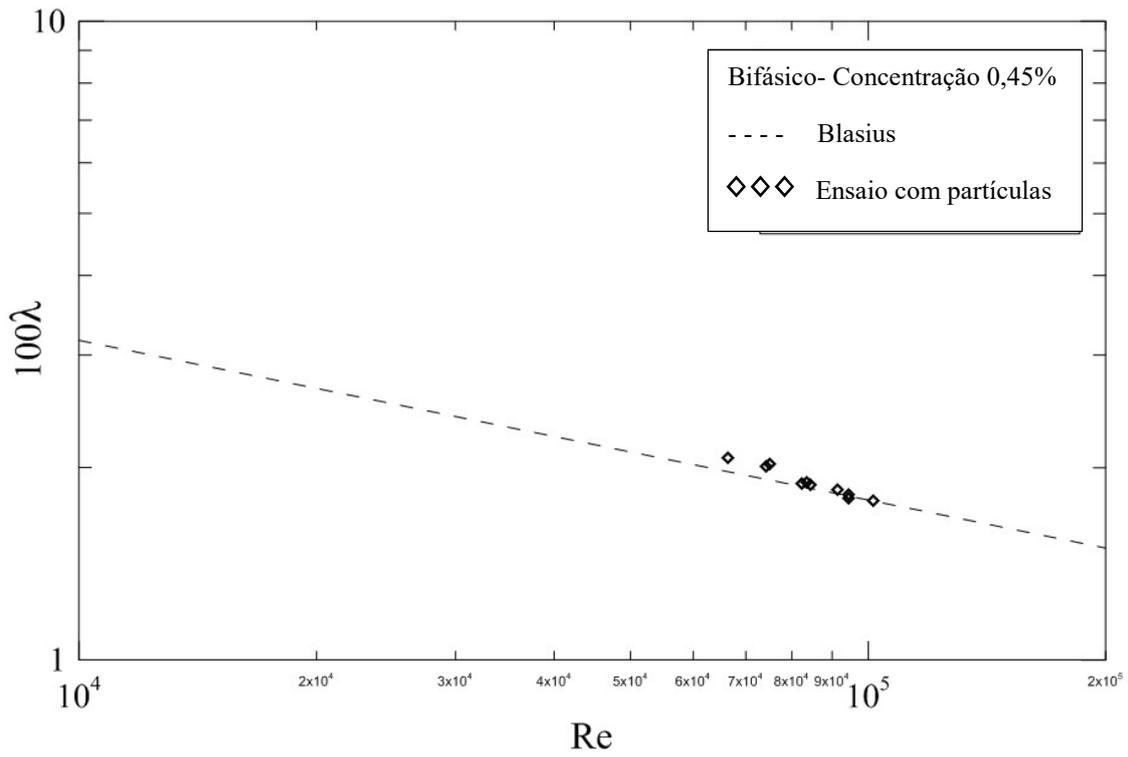


Figura 4.2: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--) e ensaio com mistura água e partícula (◇,◇)

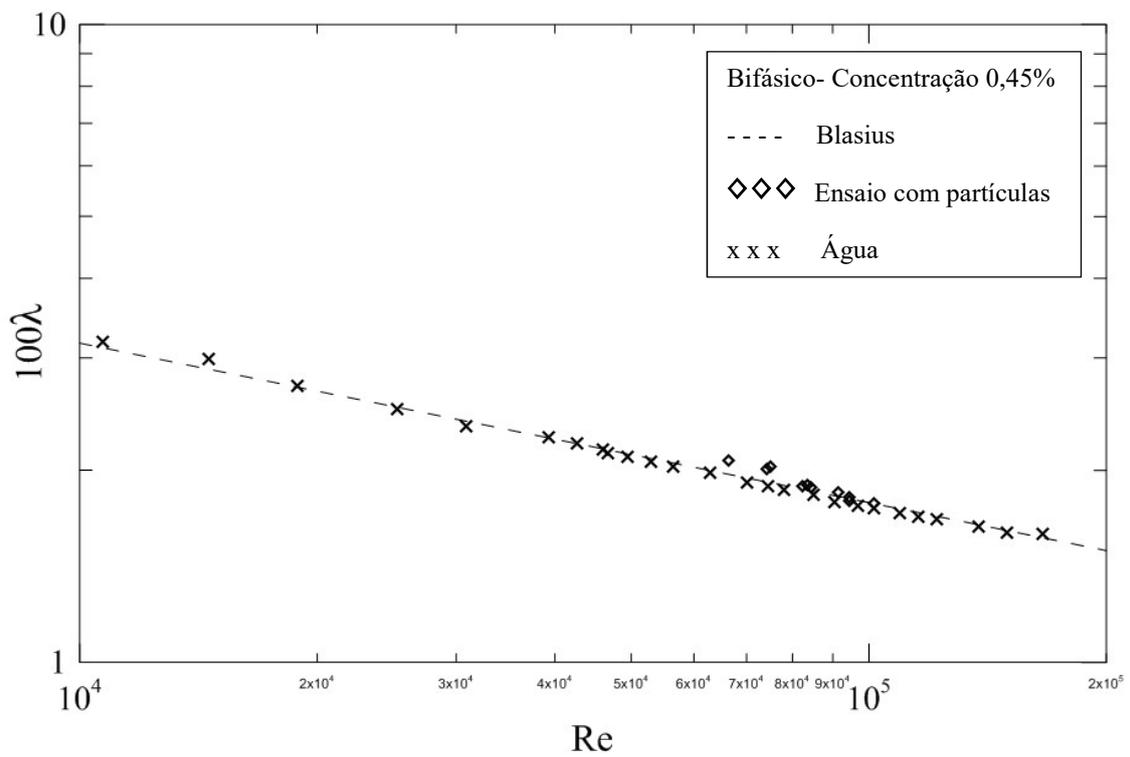


Figura 4.3: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--), ensaio com água pura (xx) e ensaio com mistura água e partícula (◇,◇)

Para os resultados obtidos na Figura 4.3, chega-se à conclusão que há uma redução na concentração devido ao aumento da vazão de líquido e que para a concentração inicial, aquela apresentada na legenda, há um aumento no fator de atrito experimental, representado pela curva do ensaio com mistura água e partícula, de 6,89% em comparação com o fator de atrito teórico, representado pela curva teórica de Blasius. Com a redução da concentração o fator de atrito converge para a curva teórica de Blasius.

Após os ensaios realizados para a concentração de 0,45% em massa deu-se início aos ensaios que utilizaram concentração média de 1,0% em massa. Assim, foram obtidos resultados comparativos entre a curva teórica de Blasius, a curva experimental para água e a curva experimental para a mistura água e partícula, conforme a Figura 4.4 e a Figura 4.5.

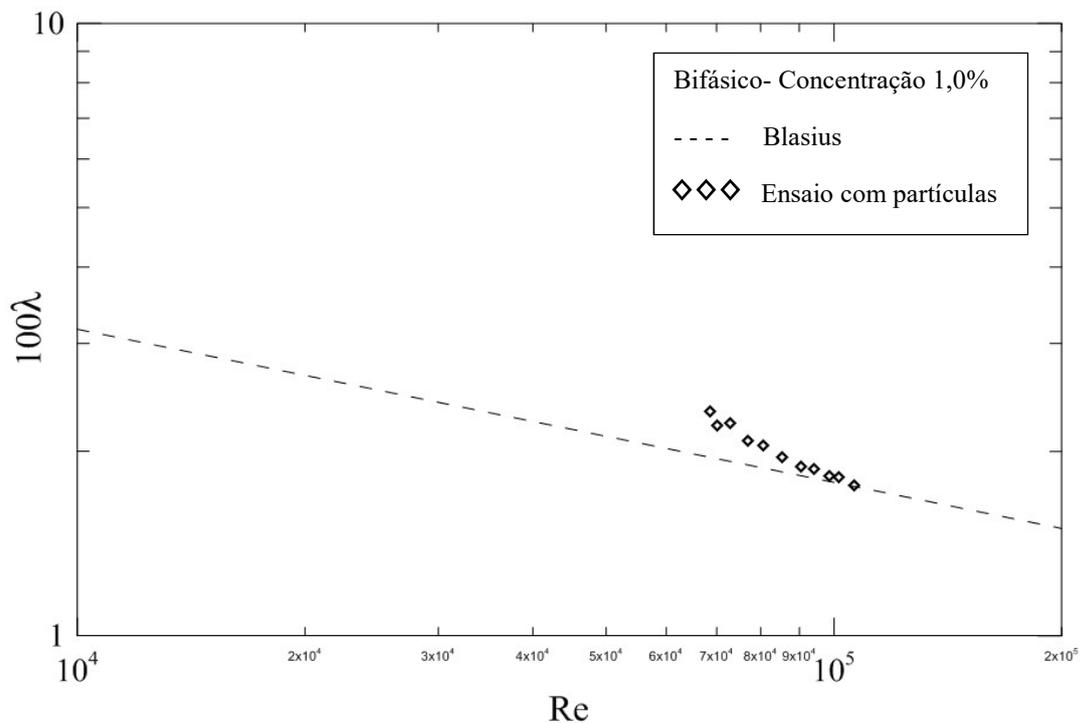


Figura 4.4: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--) e ensaio com mistura água e partícula (\diamond, \diamond)

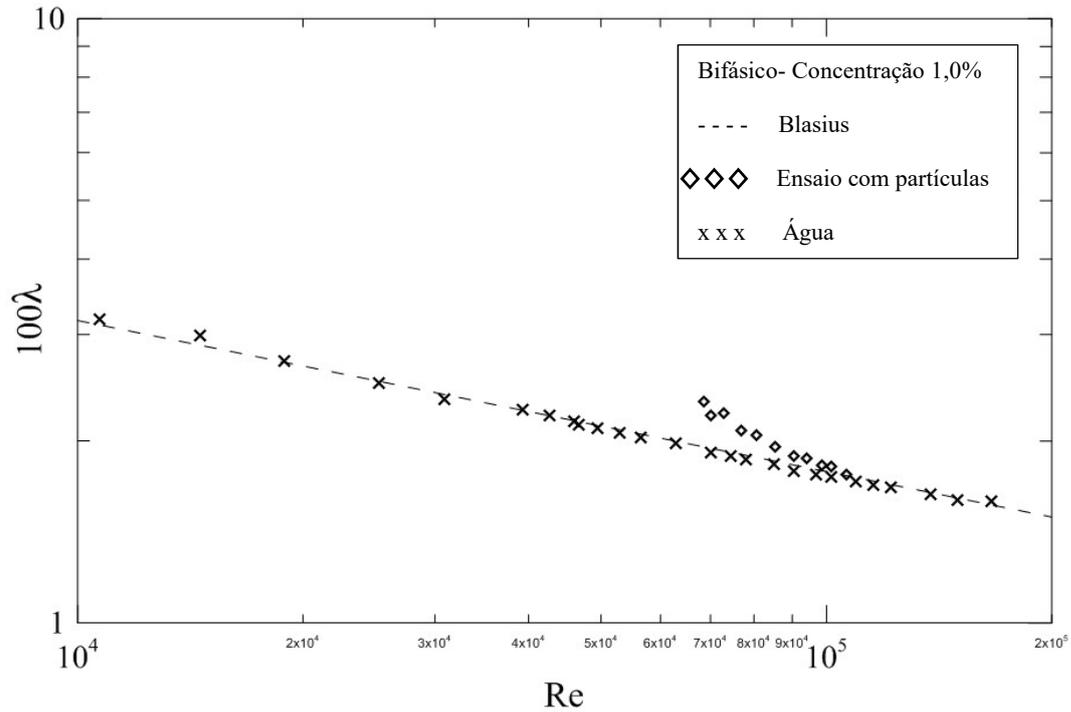


Figura 4.5: Comparativo entre curva teórica de Blasius (---), ensaio com água pura (xx) e ensaio com mistura água e partícula (◇,◇)

Ao analisar os resultados obtidos na Figura 4.5 pode-se verificar que o fator de atrito experimental, representado pela curva do ensaio com mistura água e partícula, aumentou em relação ao fator de atrito teórico, representado pela curva teórica de Blasius, chegando-se a um aumento máximo de 18,86% para a concentração inicial, a qual é apresentada na legenda. Com a redução da concentração, devido ao aumento da vazão, o fator de atrito experimental converge para o atrito teórico de Blasius.

Por último, foram realizados experimentos para mistura água e partícula sólida com concentração de entrada de 1,4% em massa e assim foram obtidos gráficos comparativos representados na Figura 4.6 e 4.7.

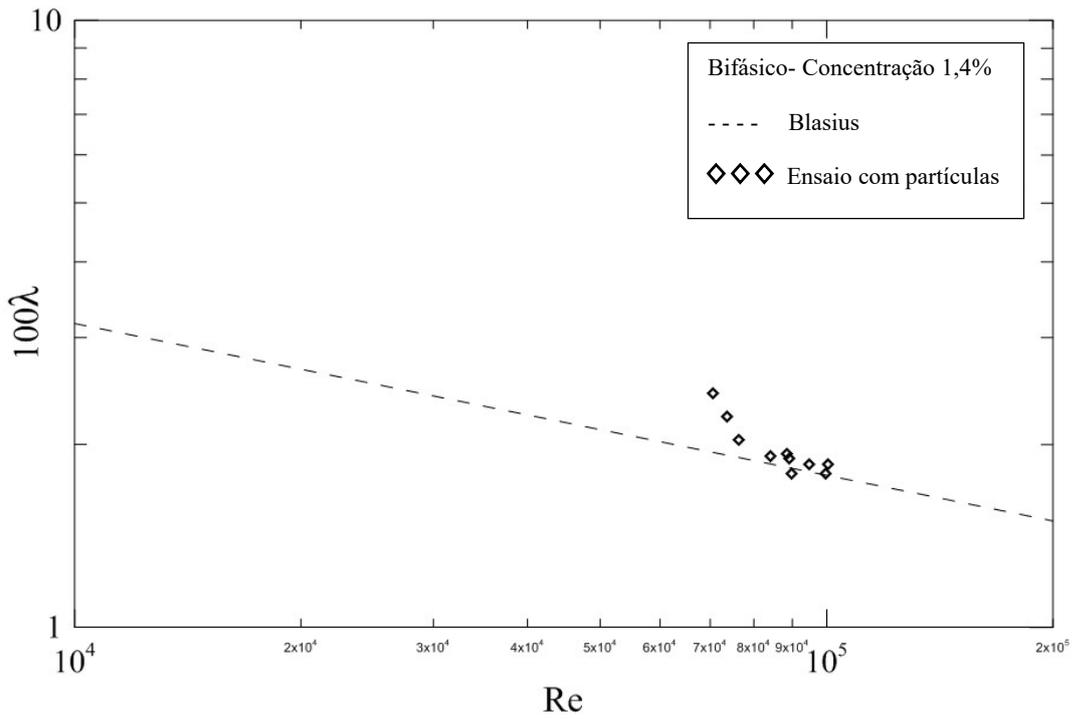


Figura 4.6: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--) e ensaio com mistura água e partícula (\diamond, \diamond)

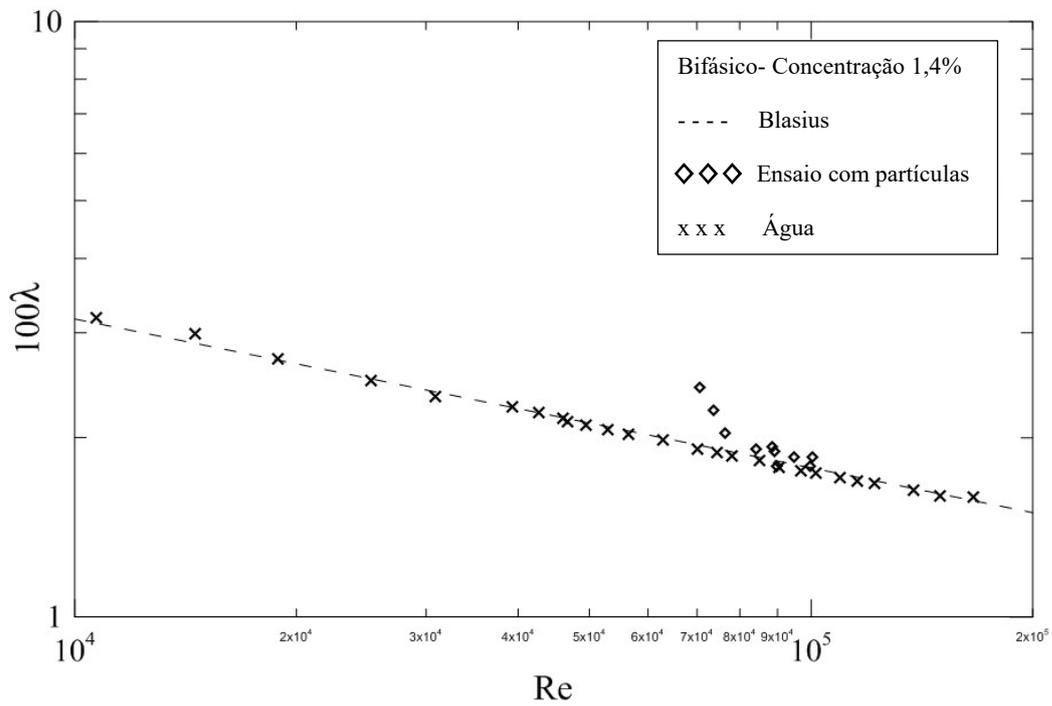


Figura 4.7: Comparativo entre curva teórica de Blasius (--), ensaio com água pura (xx) e ensaio com mistura água e partícula (\diamond, \diamond)

A partir dos resultados acima, pode-se concluir que em comparação com o fator de atrito teórico, representado pela curva teórica de Blasius, o fator de atrito experimental, representado pela curva do ensaio com mistura água e partícula, teve um aumento máximo de 25,41% para a concentração inicial de 1,4% e que houve convergência entre os fatores de atrito com o aumento da vazão de líquido.

4.2.2 Relação entre fator de atrito e número de Reynolds para diferentes concentrações

Além dos resultados anteriores, pode-se obter dados, a partir dos quais foi possível fazer o levantamento da variação do fator de atrito com a concentração para número de Reynolds aproximadamente parecidos, conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Relação entre fator de atrito e número de Reynolds para as concentrações utilizadas

Concentração em massa (%)	Reynolds	Fator de atrito	Incerteza Reynolds (%)	Incerteza fator de atrito (%)
0,45	66506,55	2,074	2,8	5,72
1,00	68505,33	2,322	2,8	5,72
1,40	70623,30	2,431	2,8	5,72
0,45	75223,04	2,027	2,8	5,72
1,00	72717,21	2,218	2,8	5,72
1,40	73812,94	2,225	2,8	5,72
0,45	84565,52	1,887	2,8	5,72
1,00	89936,36	1,892	2,8	5,72
1,40	88530,88	1,929	2,8	5,72
0,45	91548,23	1,851	2,8	5,72
1,00	93612,53	1,890	2,8	5,72
1,40	89046,25	1,897	2,8	5,72
0,45	94682,54	1,797	2,8	5,72
1,00	101755,97	1,801	2,8	5,72
1,40	100267,93	1,854	2,8	5,72

A partir dos dados da tabela acima, procurou-se verificar a influência da concentração para o “mesmo” número de Reynolds. Assim, pode-se concluir que com o aumento da concentração houve um aumento do fator de atrito.

Segundo Ghanta (1999), quanto maior a concentração, maior o número de partículas presentes e dessa forma há um aumento do atrito entre partículas e do atrito entre as partículas e a parede da tubulação, e conseqüentemente há uma maior perda de carga. Além disso, essas interações entre partículas e entre elas e a parede da tubulação causa um aumento no fator de atrito.

4.2.3 Relação entre fator de atrito e velocidade do escoamento

Os dados apresentados também permitem que seja analisado a variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento. Dessa maneira, pode-se obter alguns gráficos que representam a variação de um parâmetro em relação ao outro.

As análises realizadas foram baseadas em valores médios de concentrações, pois os dados obtidos de concentração ao longo do experimento variaram em torno de uma média, o que foi causado por limitações existentes no aparato experimental.

Assim, para escoamentos com a presença de partículas na concentração média de 0,45% observa-se o comportamento do fator de atrito em relação a velocidade do escoamento, conforme o gráfico representado pela Figura 4.8.

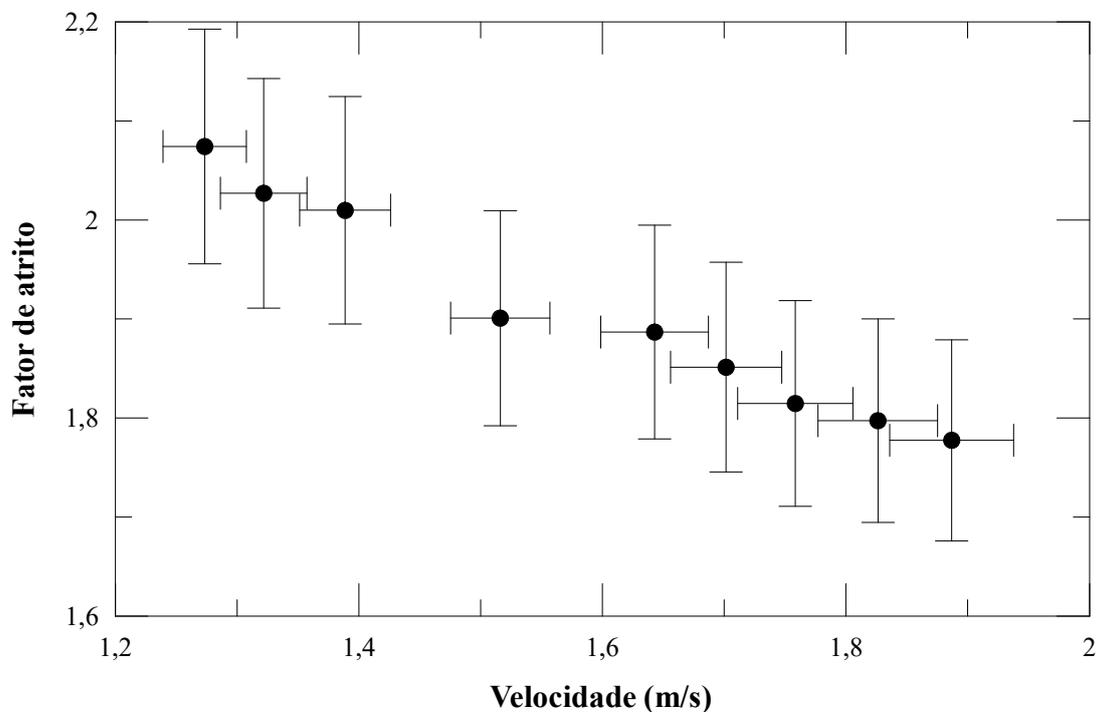


Figura 4.8: Variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento para concentração média de 0,45% em massa

Além disso, pode-se analisar a variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento para concentração média de 1,0% em massa, a qual está representada na Figura 4.9.

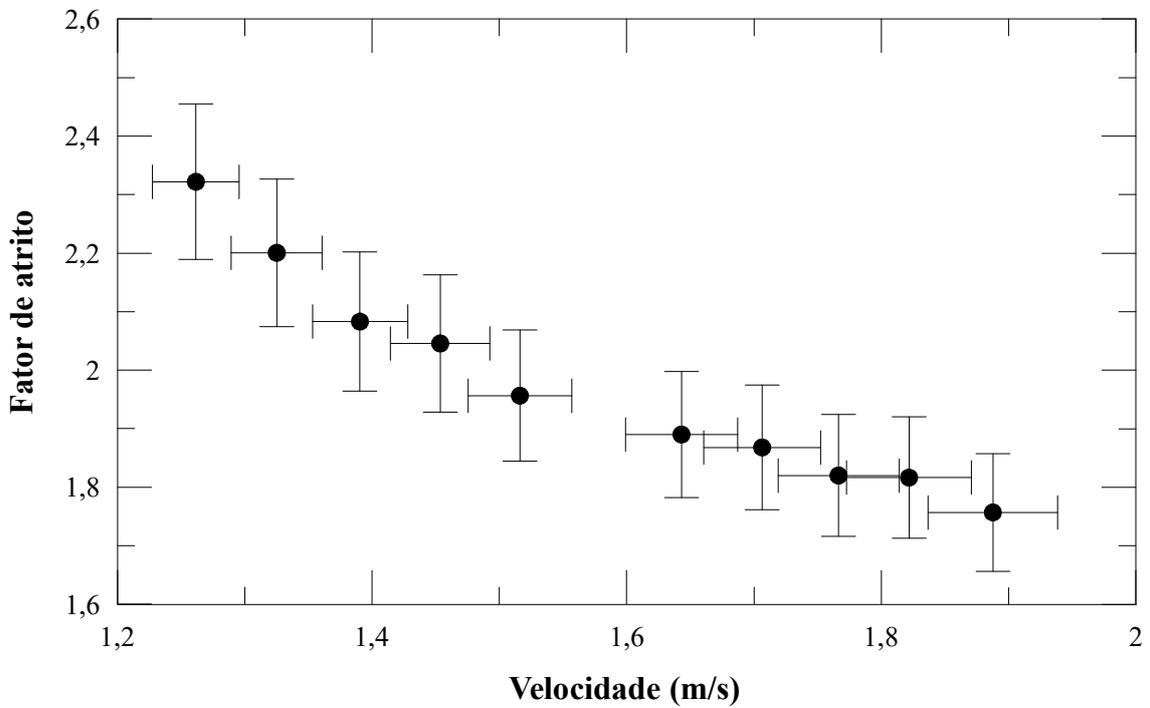


Figura 4.9: Variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento para concentração média de 1,0% em massa

Ademais, foi possível o levantamento de uma curva que relaciona o fator de atrito com a velocidade do escoamento, onde há uma concentração de partículas sólidas de 1,4% em massa, de acordo com a Figura 4.10.

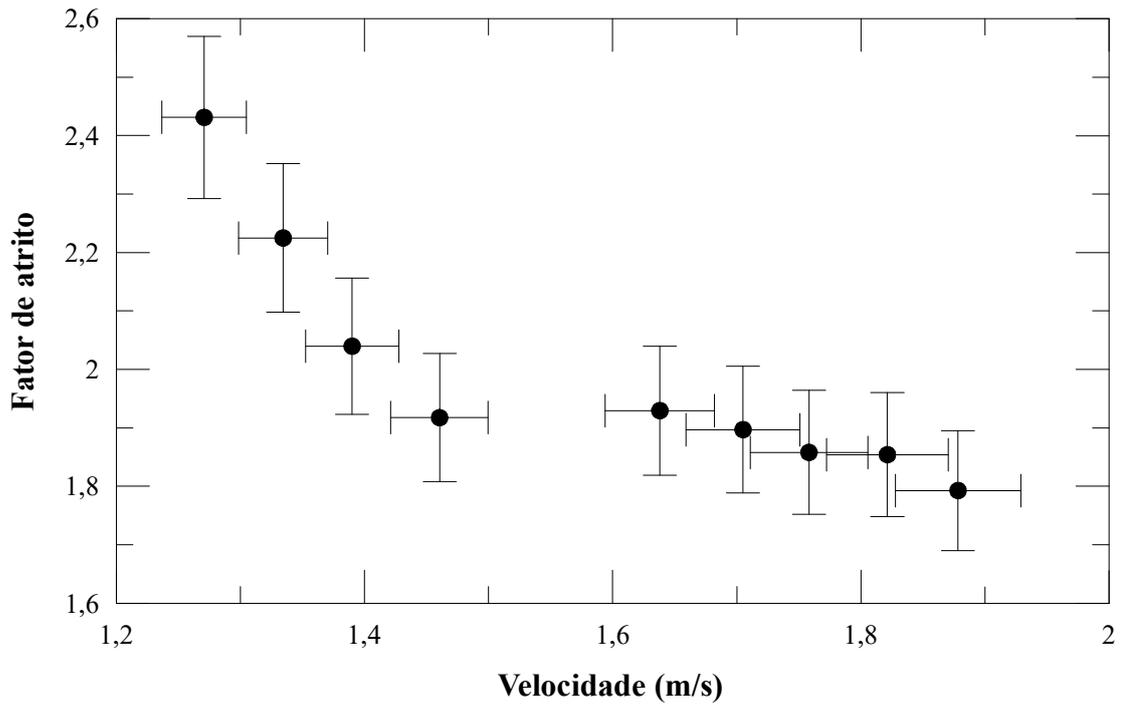


Figura 4.10: Variação do fator de atrito com a velocidade do escoamento para concentração média de 1,4% em massa

Com base nas curvas apresentadas acima, verifica-se que o fator de atrito decresce com o aumento da velocidade. Esse fato deve-se a relação existente entre o fator de atrito e o inverso do quadrado da velocidade, conforme equação (4.3), apesar de haver grande influência da tensão de cisalhamento da parede, a qual se propaga da camada limite em direção ao escoamento longe da parede.

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (4.3)$$

Pela análise da equação acima observa-se que apesar da grande influência da tensão de cisalhamento na parede, a energia cinética do escoamento cresce mais rapidamente, pois é um parâmetro elevado ao quadrado, e assim o fator de atrito decresce com o aumento da velocidade.

4.2.4 Relação entre velocidade do escoamento e perda de carga

Além de obter dados comparativos de fator de atrito teórico e experimental, foi possível analisar, através dos dados obtidos durante os ensaios, a relação entre a velocidade do escoamento e a perda de carga ao longo do aparato experimental. Dessa forma, para cada concentração pode-se obter alguns resultados.

Assim como na análise anterior, para o levantamento dos gráficos abaixo foi levada em consideração uma concentração média, pois ao longo dos experimentos, devido às limitações existentes, foram obtidas concentrações que variaram em torno de um valor médio.

Levando-se em consideração o que foi dito acima, apresenta-se na Figura 4.11 os resultados obtidos para a concentração média de 0,45%.

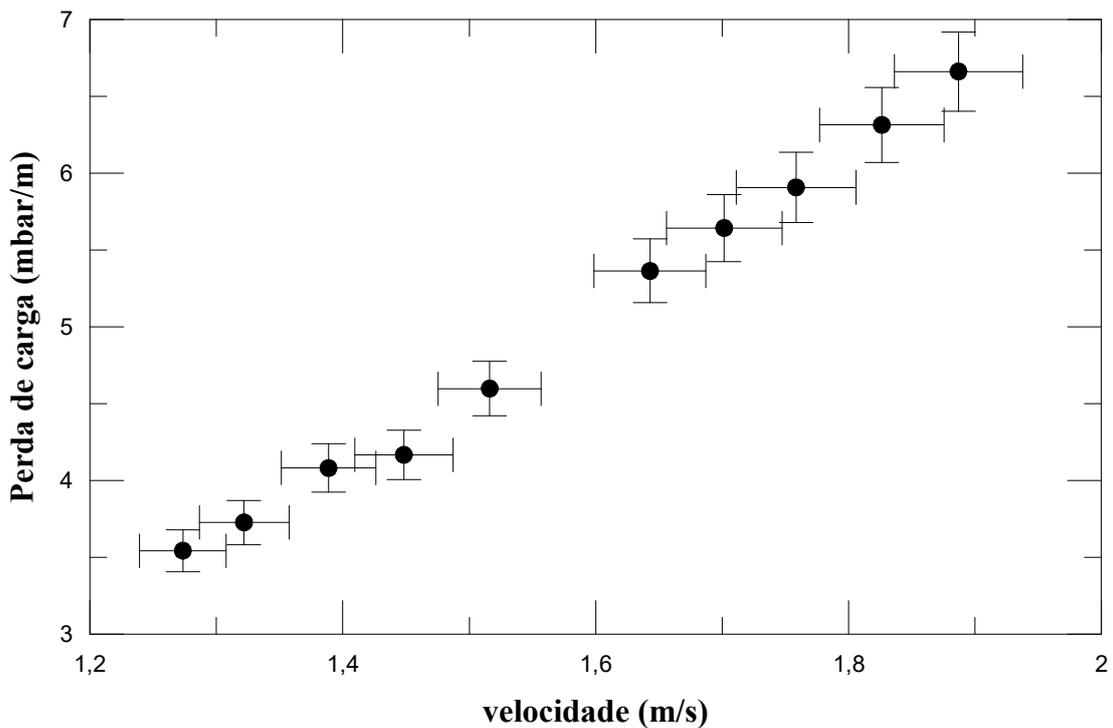


Figura 4.11: Relação entre perda de carga e velocidade para ensaio com concentração de 0,45% de partículas sólidas

Para os ensaios com concentração média de 1,0% de partículas sólidas obteve-se o resultado apresentado na Figura 4.12.

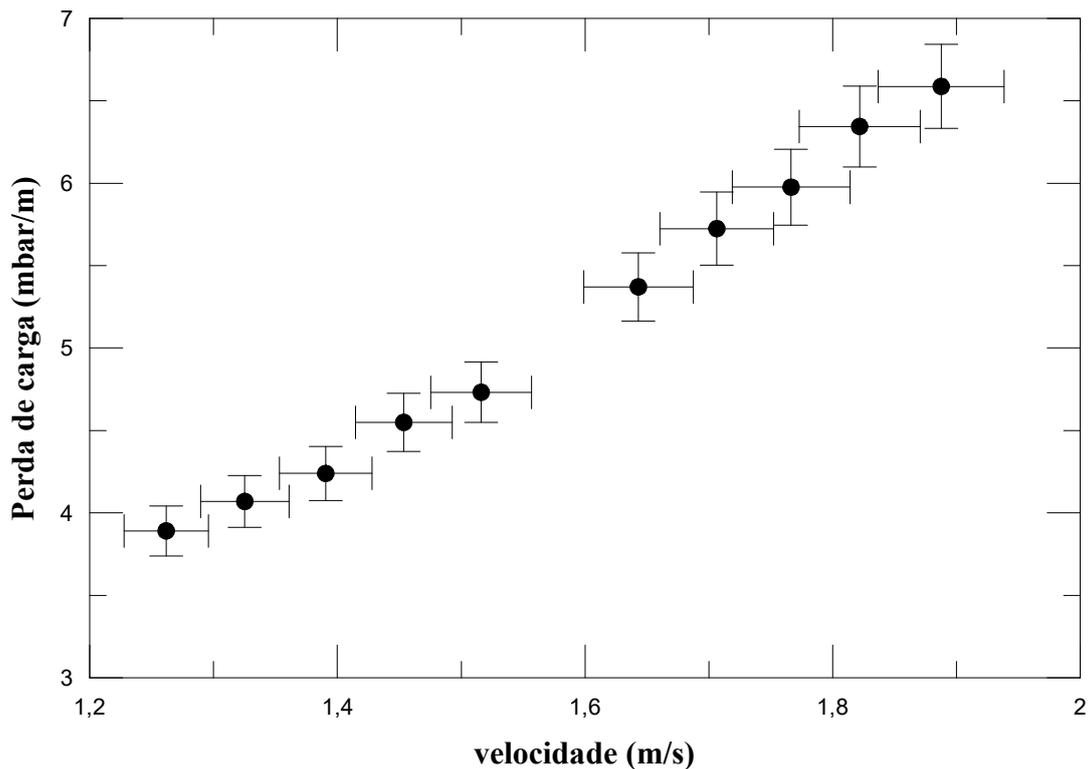


Figura 4.12: Relação entre perda de carga e velocidade para ensaio com concentração de 1,0% de partículas sólidas

Assim, com base nesses gráficos pode-se concluir que para todas as concentrações médias analisadas a perda de carga aumentou com a velocidade do escoamento.

Analisando a relação teórica entre perda de carga e velocidade chega-se à conclusão que quanto maior a velocidade maior será a perda de carga a que o escoamento está sujeito. Dessa forma, os resultados alcançados experimentalmente, representados através da Figuras 4.11 e da Figura 4.12, são ratificados por aqueles obtidos teoricamente, ou seja, de acordo com a teoria para uma maior velocidade do escoamento maior seria a perda de carga.

4.3 Velocidade Crítica

Segundo Kokpinar (2001), a velocidade crítica é a velocidade abaixo da qual as partículas sólidas começam a se depositar na parte inferior da tubulação, o que pode ocasionar perda de carga, erosão e obstrução parcial ou total da tubulação.

Dessa forma, assim como em diversos artigos, foi desenvolvida uma teoria para a velocidade crítica. Para isso, utilizou-se do equilíbrio de corpo livre de uma partícula presente no interior de um escoamento turbulento, conforme figura abaixo:

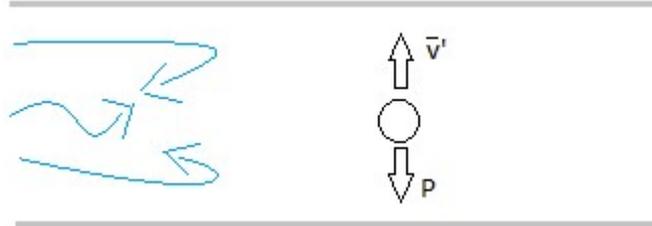


Figura 4.13: Equilíbrio de corpo livre da partícula

Partindo-se da relação entre a tensão de cisalhamento e as flutuações turbulentas do campo de escoamento, conforme Freire (2002), temos:

$$\tau_w = \rho \bar{u}' \bar{v}' \quad (4.4)$$

Sabendo-se que \bar{u}' é aproximadamente da ordem de \bar{v}' e dividindo a equação (4.4) por $\frac{1}{2} \rho U^2$, temos:

$$\frac{f}{2} = \frac{\bar{v}'^2}{U^2} \quad (4.5)$$

onde f é o fator de atrito de Fanning e U é a velocidade do escoamento.

Dessa forma, temos:

$$\frac{\bar{v}'}{U} \approx \sqrt{\frac{f}{2}} \quad (4.6)$$

No sistema da Figura 4.13, para que a partícula esteja em suspensão, deve-se ter:

$$F_a > P \quad (4.7)$$

Onde F_a é o a força de arrasto e P é o peso da partícula. De acordo com Flemmer (1986), a força de arrasto é definida como:

$$F_a = C_a \frac{v^2}{2} \rho A \quad (4.8)$$

Onde C_a é o coeficiente de arrasto; v é a velocidade do escoamento; ρ é a massa específica do fluido e A é a área do corpo.

Substituindo (4.8) em (4.7) e isolando v temos:

$$v > \sqrt{\frac{2 mg}{C_a A_p \rho_f}} \quad (4.9)$$

Substituindo v da equação (4.6) na equação (4.9) e desenvolvendo chega-se a:

$$f > \frac{4 mg}{C_a A_p \rho_f} \frac{1}{U^2} \quad (4.10)$$

Considerando a equação de Blasius, temos:

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (4.11)$$

Substituindo a equação (4.11) na equação (4.10), desenvolvendo e isolando U , chegamos finalmente a:

$$U > \alpha \left(\frac{1}{0,316} \right)^{1/7} \left(\frac{4 mg}{C_a A_p \rho_f} \right)^{4/7} \left(\frac{D}{\nu} \right)^{1/7} \quad (4.12)$$

Onde $\alpha = 0,62$ é uma constante de ajuste; D é o diâmetro interno da tubulação em metros; ν é a viscosidade cinemática em m^2/s ; A_p é a área da partícula em m^2 e ρ_f é a massa específica da água em kg/m^3 .

Baseado na equação desenvolvida no presente trabalho pode-se avaliar a congruência dos valores obtidos através da equação (4.12) com aqueles alcançados por diversos autores da literatura, os quais foram citados por Davies (1987), conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tabela de valores de velocidade crítica

d(m)	D(m)	Thomas (1979) (exp)	Oroskar et al (1980) (exp)	Parzonka et al (1981) (exp)	Durand et al (1952) (empirico)	Davies (1987) (empirico)	Calculado equação (4.12)
0,0001	0,026	–	0,8	0,7	1,1	1	0,8
0,00013	0,0094	0,7	0,5	–	0,7	0,7	0,8
0,00013	0,019	0,8	0,7	–	0,9	0,9	0,8
0,00013	0,105	1,5	1,5	–	2,2	1,9	1,1
0,0002	0,202	–	2,2	2,2	3,3	2,8	1,5
0,00023	0,026	–	0,9	0,9	1,2	1,1	1,2
0,00025	0,41	–	3,2	2,9	4,7	4	1,9
0,00028	0,7	–	4,3	4	6,4	5,3	2,2
0,0004	0,103	–	1,8	2,3	2,6	2,3	2,0
0,00042	0,308	–	3,1	3,4	4,5	4	2,5
0,00042	0,206	–	2,6	2,9	3,7	3,3	2,3
0,00044	0,15	–	2,2	2,7	3,2	2,9	2,3
0,00057	0,051	–	1,4	1,7	1,9	1,8	2,3
0,00059	0,108	–	2	2,2	2,7	2,6	2,6
0,00065	0,026	–	1	0,9	1,3	1,4	2,2
0,00075	0,089	–	1,9	1,5	2,4	2,4	2,9
0,00085	0,076	–	1,8	1,7	2,2	2,3	3,0
0,0012	0,019	0,7	1	–	1,1	1,3	3,0
0,0012	0,108	1,9	2,2	2,6	2,5	2,9	3,9

De acordo com os dados da Tabela 4.3 foram obtidos gráficos onde os resultados provenientes da equação (4.12) puderam ser comparados com aqueles obtidos pelos autores expostos na mesma, conforme Figura 4.14 a Figura 4.18.

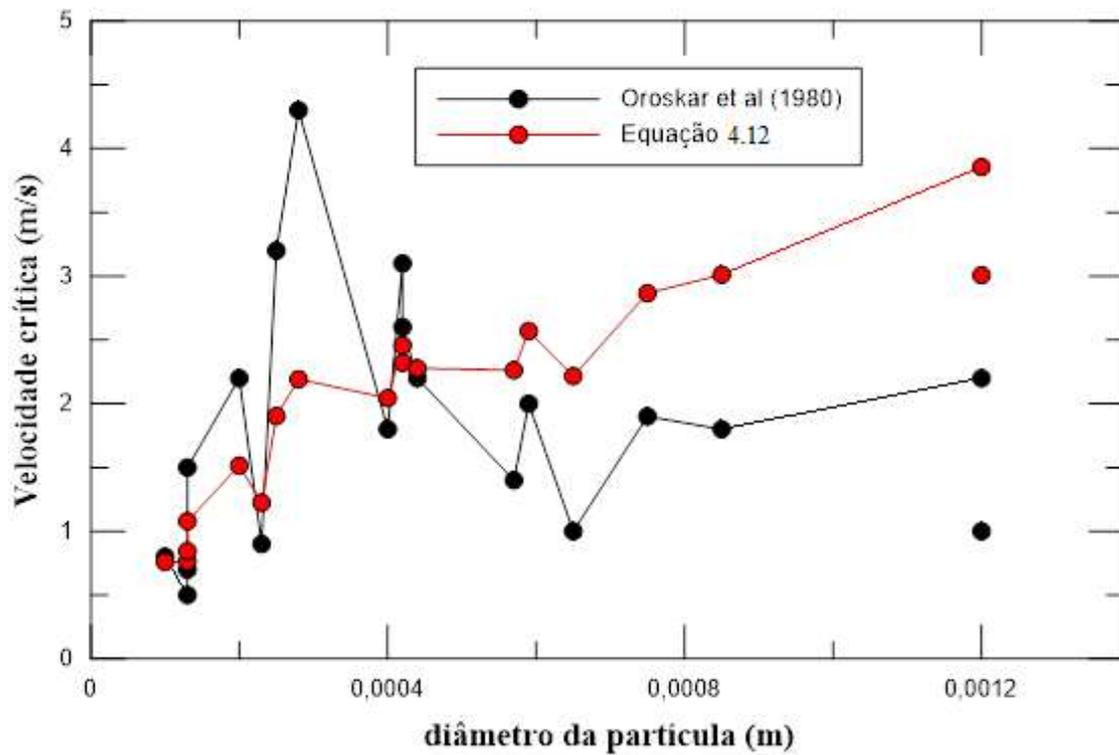


Figura 4.14: Comparação de resultados obtidos por Oroskar et al (1980) e através da Equação (4.12)

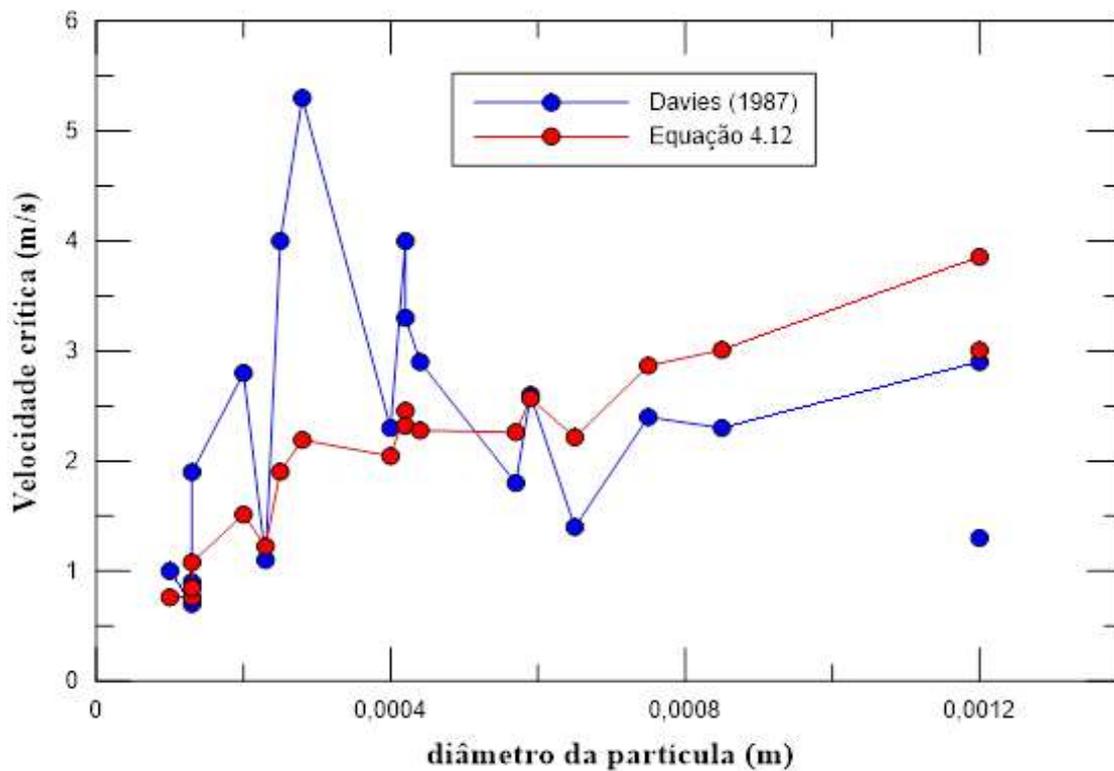


Figura 4.15: Comparação de resultados obtidos por Davies (1987) e através da Equação (4.12)

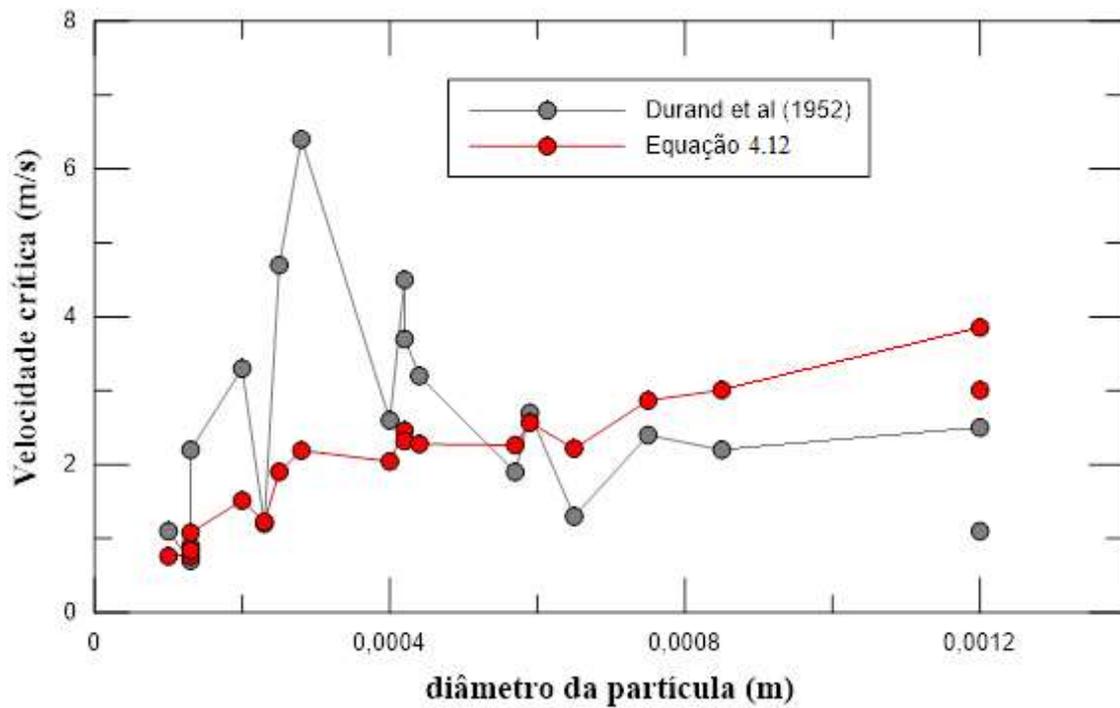


Figura 4.16: Comparação de resultados obtidos por Durand et al (1952) e através da Equação (4.12)

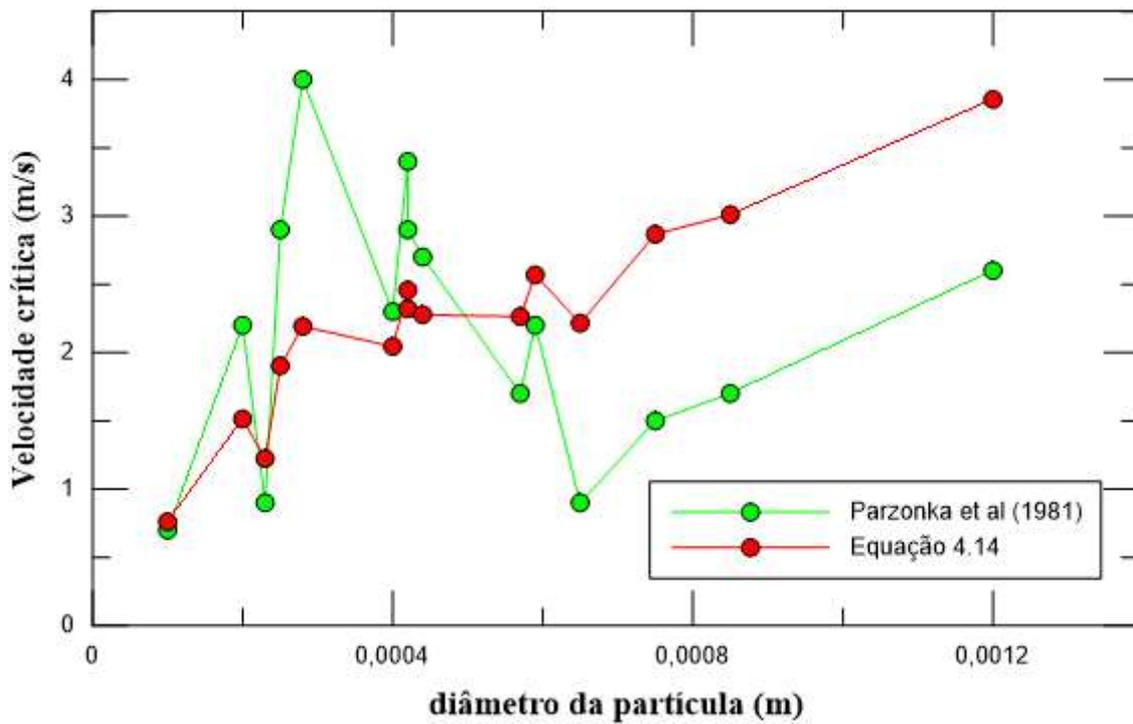


Figura 4.17: Comparação de resultados obtidos por Parzonka et al (1981) e através da Equação (4.12)

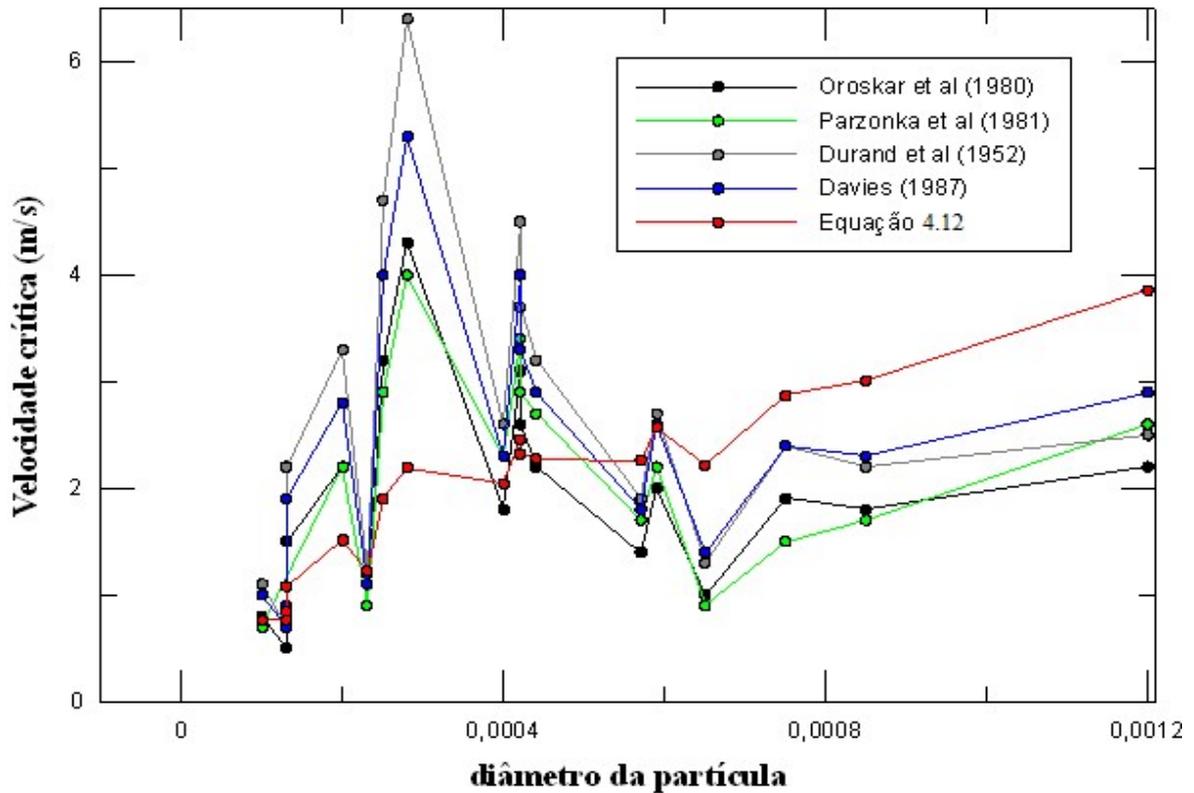


Figura 4.18: Comparação entre valores experimentais e aqueles obtidos por equações empíricas

Baseado nos gráficos acima, pode-se verificar que os resultados obtidos através da equação (4.12) quando comparada àqueles alcançados pelos demais autores possui uma concordância qualitativa, porém com valores que aumentam de forma mais progressiva.

Observando-se os gráficos apresentados na Figura 4.14 a Figura 4.18, verifica-se a existência de pontos que estão fora da curva do autor em questão e daquela que representa a equação desenvolvida. Esses pontos foram considerados discordantes com os demais, porém apresentados nos gráficos por serem parte dos dados obtidos pelos autores.

Davies (1987) ao citar as relações empíricas dos demais autores evidencia a existência da influência da concentração de partículas no escoamento. Segundo esse autor, a equação desenvolvida por Durand et al (1952) corresponde a equação (4.13):

$$v_m = F_1 [2g (\Delta\rho/ \rho_L)]^{1/2} D^{1/2} \quad (4.13)$$

Onde F_1 depende do diâmetro da partícula e da concentração de sólidos na tubulação. Já a equação desenvolvida por Davies (1987), representada pela equação (4.14) é:

$$v_m = F_7 [2g (\Delta\rho / \rho_L)]^{0,54} D^{0,46} \quad (4.14)$$

Onde F_7 é uma função que também depende do diâmetro das partículas e da concentração.

Além disso, segundo Hashemi (2005), quanto maior a concentração maior a frequência com que as partículas colidem e conseqüentemente maior a perda de energia e maior aumento da troca de momento entre as partículas, ou seja, essas interações existentes evidenciam a influenciada concentração na velocidade crítica.

Assim, pode-se concluir que a diferença existente entre os valores resultantes da equação (4.14) e aqueles encontrados nos diversos trabalhos pode estar relacionada a não inclusão de um fator referente a concentração, ou seja, a ausência de um fator que leve em consideração a interação entre partículas e delas com a parede da tubulação.

4.4 Padrão de escoamento

O padrão de escoamento é fortemente dependente da velocidade crítica. De acordo com a velocidade crítica calculada o padrão de escoamento poderá ter diversas classificações, dependendo do autor, conforme aquelas apresentadas na revisão bibliográfica.

Para o trabalho em questão, foi calculada a velocidade crítica de acordo com a equação 4.14 e obteve-se um valor médio de 1,16 m/s. Assim, para todas as concentrações utilizadas, ao se comparar os valores de velocidade do escoamento com a velocidade crítica calculada, pode-se perceber que aquela é maior que essa.

Com isso, através das classificações apresentadas, o padrão de escoamento presente no trabalho em questão seria heterogêneo, de acordo com a classificação de Doron e Barnea (1996), e estaria entre não estratificado e parcialmente estratificado de acordo com a classificação apresentada por Matousek (2006).

Apesar de ser um parâmetro de grande influência, para garantir qual padrão de escoamento está presente, além da velocidade crítica, são necessários testes analíticos para determinar o gradiente de concentração existente na seção transversal da tubulação e assim determinar com exatidão o padrão de escoamento. Dessa forma, apesar de a velocidade crítica indicar o provável padrão, não se pode afirmar, com certeza, a qual classificação o escoamento do presente trabalho atenderá.

Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas conclusões a respeito dos resultados obtidos durante os ensaios experimentais para um escoamento bifásico líquido-sólido.

5.1 Conclusões

No presente trabalho foi realizada a análise de um escoamento bifásico do tipo líquido-sólido, o qual se deu através de uma tubulação de aço inox de 50,8 mm de diâmetro, posicionada horizontalmente e equipada com tomadas de pressão ao longo de todo o comprimento da tubulação, posicionadas de 2 em 2 metros. Para os ensaios foram utilizadas partículas sólidas de carbetto de silício, com formato aproximadamente esférico e de diâmetro de 150 μm , conforme informações do fornecedor. A faixa de vazão utilizada foi de 7,0 a 12,0 m^3/h e foi realizada análise da perda de carga para escoamentos com concentrações em massa de 0,45%, 1,0% e 1,4% de partículas sólidas.

Com base nas análises realizadas, chega-se à conclusão que o aparato experimental foi corretamente montado devido a concordância entre os valores alcançados experimentalmente e a reta correspondente a equação teórica de Blasius. Além do mais, verificou-se que a injeção de partículas sólidas no escoamento, inicialmente monofásico, ocasionou o aumento do fator de atrito. Esse aumento foi tanto maior quanto menor a vazão de líquido utilizada, sendo observado um distanciamento maior em relação aos valores atingidos com apenas a fase líquida para vazões baixas e chegando-se a equivalência quando eram utilizadas as maiores vazões.

Ademais, através dos ensaios obtidos experimentalmente verifica-se que o gradiente de pressão é fortemente influenciado pela concentração de partículas sólidas. Além disso, a perda de carga aumenta com o aumento da velocidade do escoamento, apesar do fator de atrito decrescer com o aumento da mesma.

Em conformidade com os dados obtidos através dos ensaios chega-se à conclusão que para número de Reynolds próximos, quanto maior a concentração maior o fator de atrito. Esse comportamento está relacionado a presença de choques entre partículas, que aumenta com a concentração, e também pelas interações entre as partículas e a parede da tubulação.

Quanto a formulação de velocidade crítica proposta, verifica-se uma determinada equivalência qualitativa entre os resultados obtidos através da equação (4.14) e aqueles alcançados experimentalmente e através de fórmulas empíricas desenvolvidas pelos autores citados. Entretanto, há um distanciamento entre os valores, o qual se deve à ausência de um parâmetro representativo das interações entre partículas e entre elas e a parede da tubulação, ou seja, devido a inexistência de um fator que leva em consideração a concentração de partículas no escoamento.

5.2 Trabalhos futuros

Com base nos dados obtidos no presente trabalho, além dos problemas que ocorreram ao longo da pesquisa pode-se propor algumas sugestões para trabalhos futuros:

1 – O presente trabalho propôs a medição da perda de carga para baixas concentrações de partículas sólidas, além de haver limitações no sistema, como volume de líquido, não se pode obter muitos pontos para compor a curva de perda de carga. Dessa forma, sugere-se que seja utilizado maior volume de líquido para que possam ser realizados ensaios para maiores vazões;

2 – Os ensaios foram realizados em ambiente onde não havia controle de temperatura e com isso houve grande influência da mesma nos dados obtidos, principalmente no número adimensional de Reynolds. Assim, sugere-se que trabalhos futuros sejam realizados em ambientes controlados para que haja a menor influência possível nos dados experimentais;

3 – Propõe-se que sejam realizadas medições do perfil de velocidade do escoamento de forma a verificar a influência das partículas;

4 – Para futuros trabalhos, pode-se substituir uma parte da tubulação de aço por uma tubulação de acrílico, de forma a verificar, por meio de instrumentação adequada, a variação da concentração ao longo da seção transversal da tubulação e assim indicar o padrão de escoamento presente;

5 – Propõe-se que sejam realizados ensaios em maiores faixas de concentração de partículas;

6 – Sugere-se que sejam realizados ensaios em tubulações inclinadas e declinadas utilizando as presentes concentrações, de forma a se comparar as perdas de carga;

7 – Quanto ao desenvolvimento da equação para a velocidade crítica, para futuros trabalhos, deve-se adicionar à equação um parâmetro que leva em consideração a concentração de partículas sólidas e conseqüentemente as interações entre elas e delas com a parede da tubulação.

Referências

BARCELOS, R.; ARAÚJO, E.; VILALTA, G. “Análise da influência das propriedades do minério de ferro no bombeamento de polpas de rejeitos minerais em sistemas com bombas volumétricas via simulação e planejamento de experimentos”. **XV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial - CONEMI**; Novo Hamburgo, RS: Universidade FEEVALE, Out 2015.

CAPECELATRO, Jesse; DESJARDINS, Olivier. “Eulerian–Lagrangian modeling of turbulent liquid–solid slurries in horizontal pipes”. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 55, p. 64-79, 2013.

CHANDEL, Sunil; SINGH, S. N.; SESHADRI, V. “Transportation of high concentration coal ash slurries through pipelines”. **International Journal Archive of Applied Sciences and Technology**, v. 1, pp. 1-9, 2010.

CHEN, Liangyong et al. “CFD simulation of coal-water slurry flowing in horizontal pipelines”. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 4, pp. 1144-1154, 2009.

DABIRIAN, Ramin et al. “Critical sand deposition velocity for gas-liquid stratified flow in horizontal pipes”. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 33, p. 527-537, 2016.

DAVIES, J. T. Calculation of critical velocities to maintain solids in suspension in horizontal pipes. **Journal of Chemical Engineering Science**, v. 42, n. 7, pp. 1667-1670, 1987.

DORON, Pinchas; BARNEA, Dvora. “Flow pattern maps for solid-liquid flow in pipes”. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 22, n. 2, p. 273-283, 1996.

DURAND, R.; CONDOLIOS, E. “Experimental investigation of the transport of solids in pipes”. **Deuxieme Journée de lhydraulique, Societé Hydrotechnique de France**, 1952.

EESA, M.; BARIGOU, M. “CFD investigation of the pipe transport of coarse solids in laminar power law fluids”. **Journal of Chemical Engineering Science**, v. 64, n. 2, pp. 322-333, 2009.

EGOLF, Peter W.; KAUFFELD, Michael. “From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications”. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, n. 1, pp. 4-12, 2005.

FLEMMER, Rory LC; BANKS, C. L. “On the drag coefficient of a sphere”. **International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems: Powder Technology**, v. 48, n. 3, pp. 217-221, 1986.

GHANTA, Kartik Chandra; PUROHIT, N. K. “Pressure drop prediction in hydraulic transport of bi-dispersed particles of coal and copper ore in pipeline”. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 77, n. 1, p. 127-131, 1999.

GOPALIYA, Manoj Kumar; KAUSHAL, D. R. “Modeling of sand-water slurry flow through horizontal pipe using CFD”. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 3, p. 261-272, 2016.

GÜNER, M. “Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds”. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 3, pp. 904-913, 2007.

HOSSAIN, Alamgir; NASER, Jamal; IMTEAZ, Monzur Alam. “CFD investigation of particle deposition in a horizontal looped turbulent pipe flow”. **Journal of Environmental Modeling & Assessment**, v. 16, n. 4, pp. 359-367, 2011.

HASHEMI, Seyed Abdolreza. **Velocity and concentration fluctuations in concentrated solid-liquid flows**. 2013. D.Sc. dissertation. University of Alberta at Edmonton, Alberta, Canada.

ISMAIL, Idris et al. “Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry”. **Journal of Flow Measurement and Instrumentation**, v. 16, n. 2-3, pp. 145-155, 2005.

JIANG, Feng et al. “Pressure drop in horizontal multi-tube liquid–solid circulating fluidized bed”. **International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems: Powder Technology**, v. 333, pp. 60-70, 2018.

KAUSHAL, D. R. et al. “Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry”. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 31, n. 7, p. 809-823, 2005.

KAUSHAL, D. R., Tomita, Y., “An Improved Method for Predicting Pressure Drop along Slurry pipeline”. **Particulate Science and Technology**, v.20, n. 4, pp. 305-324, 2002.

KAUSHAL, D. R. et al. “CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration”. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 43, pp. 85-100, 2012.

KÖKPINAR, Mehmet Ali; GÖĞÜŞ, Mustafa. “Critical flow velocity in slurry transporting horizontal pipelines”. **Journal of Hydraulic engineering**, v. 127, n. 9, pp. 763-771, 2001.

KUMAR, Navneet; SINGH, Desh Bandhu; SHARMA, Sanjeev Kumar. “CFD Analysis of Two-phase Flow Characteristics in Horizontal Pipeline”. **International Conference on Computational and Experimental Methods in Mechanical Engineering**, pp. 163-177, 2017.

LAHIRI, Sandip K.; GHANTA, Kartik Chandra. “Artificial neural network model with parameter tuning assisted by genetic algorithm technique: study of critical velocity of slurry flow in pipeline”. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, v. 5, n. 5, pp. 763-777, 2010.

LI, M. Z. et al. “Effect of interaction of particles with different sizes on particle kinetics in multi-sized slurry transport by pipeline”. **International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems: Powder Technology**, v. 338, pp. 915-930, 2018.

LIN, C. X.; EBADIAN, M. A. “A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe”. **International Journal: Computers & Fluids**, v. 37, n. 8, pp. 965-974, 2008.

LING, J. et al. “Numerical investigations of liquid–solid slurry flows in a fully developed turbulent flow region”. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 24, n. 3, pp. 389-398, 2003.

LIU, H. 2003. **Pipeline Engineering**. 1 edition. Whashington, D.C, CRC Press, 2003.

LU, Bona et al. “Multi-scale CFD simulation of gas–solid flow in MIP reactors with a structure-dependent drag model”. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 18-20, pp. 5487-5494, 2007.

MATOUSEK, V. “Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes”. **International Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics**, v. 26, n. 6-7, pp. 693-702, 2002.

MENDES, Alexandre; ROSÁRIO, Pedro Paulo. **Metrologia & incerteza de medição**. Editora EPSE, 2005.

NABIL, Tamer; EL-SAWAF, Imam; EL-NAHHAS, Kamal. “Computational fluid dynamics simulation of the solid-liquid slurry flow in a pipeline”. In: **17th International Water Technologies Conference IWTC17**, Istanbul, Nov. 2013.

NAJMI, Kamyar et al. “Experimental Study of Low Concentration Sand Transport in Multiphase Air–Water Horizontal Pipelines”. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 137, n. 3, pp. 032908, 2015.

NIKURADSE, Johann. **Laws of flow in rough pipes**. National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, 1950.

OROSKAR, Anil R.; TURIAN, Raffi M. “The critical velocity in pipeline flow of slurries”. **AIChE Journal**, v. 26, n. 4, pp. 550-558, 1980.

PAHK, Jae Bum; KLINZING, George E. “Comparison of flow characteristics for dilute phase pneumatic conveying for two different plastic pellets”. **Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers**, v. 39, n. 2, p. 143-150, 2008.

PAIVA, Túlio André. **Aplicação de técnicas ultrassônicas para análise de escoamentos multifásicos do tipo líquido-sólido e líquido-sólido-gás**. Dissertação de M.Sc. Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, MG, Brasil, 2011.

PARZONKA, W.; KENCHINGTON, J. M.; CHARLES, M. E. “Hydrotransport of solids in horizontal pipes: effects of solids concentration and particle size on the deposit velocity”. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 59, n. 3, pp. 291-296, 1981.

PEIYI, Wu; LITTLE, W. A. “Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thomson refrigerators”. **Cryogenics**, v. 23, n. 5, p. 273-277, 1983.

QI, Chongchong et al. “Pressure drop in pipe flow of cemented paste backfill: Experimental and modeling study”. **International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems: Powder Technology**, v. 333, p. 9-18, 2018.

RUAS, Patrícia Haueisen Dias et al. **Análise teórica do escoamento bifásico e/ou dois-fluidos imiscíveis anular ascendente via GITT**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, PB, Brasil, 2016.

SALAMA, Mamdouh M. et al. “Sand production management”. **Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Energy Resources Technology**, v. 122, n. 1, pp. 29-33, 2000.

SKUDARNOV, P. V.; LIN, C. X.; EBADIAN, M. A. “Double-species slurry flow in a horizontal pipeline”. **Journal of Fluids Engineering**, v. 126, n. 1, pp. 125-132, 2004.

SUGANTHI, K. S.; RAJAN, K. S. “Effect of calcination temperature on the transport properties and colloidal stability of ZnO–water nanofluids”. **Asian Journal of Scientific Research**, v. 5, pp. 207-217, 2012.

THOMAS, A. D. “Predicting the deposit velocity for horizontal turbulent pipe flow of slurries”. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 5, n. 2, pp. 113-129, 1979.

VERMA, Abhai Kumar; SINGH, S. N.; SESHADRI, V. “Pressure drop for the flow of high concentration solid-liquid mixture across 90° horizontal conventional circular pipe bend”. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v. 13, pp. 477-483, 2006.

A. Dados complementares referentes aos ensaios com partículas

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos durante os ensaios realizados durante a pesquisa e que foram utilizados para o levantamento dos gráficos de fator de atrito por número de Reynolds, de fator de atrito por velocidade e de perda de carga por velocidade do escoamento.

Tabela A.1: Tabela de dados experimentais resultante dos ensaios com tubo liso para concentração média de 0,45%

Q (m ³ /h)	D(m)	A(m ²)	U(m/s)	$\frac{dp}{dx}$	T. Calib [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	u [m ² /s]	Re (Temp)	100 Darcy (Dp/Dx)	Incert. Re (%)	Incert. 100 Darcy (%)	Incert. $\frac{dp}{dx}$ (%)	Incert. U (%)	Conc.
8,071	0,04735	1,76E-03	1,274	3,543	24,7	997,12	9,04E-04	9,07E-07	66506,55	2,074	2,80	5,72	3,87	2,69	0,54
8,378	0,04735	1,76E-03	1,322	3,726	28,4	996,12	8,29E-04	8,32E-07	75223,04	2,027	2,80	5,72	3,87	2,69	0,52
8,801	0,04735	1,76E-03	1,389	4,080	25,7	996,87	8,83E-04	8,86E-07	74205,69	2,010	2,80	5,72	3,87	2,69	0,50
9,179	0,04735	1,76E-03	1,448	4,166	28,5	996,09	8,27E-04	8,30E-07	82614,72	1,888	2,80	5,72	3,87	2,69	0,48
9,609	0,04735	1,76E-03	1,516	4,598	27,1	996,49	8,55E-04	8,58E-07	83660,51	1,901	2,80	5,72	3,87	2,69	0,46
10,412	0,04735	1,76E-03	1,643	5,364	24,1	997,27	9,17E-04	9,20E-07	84565,52	1,887	2,80	5,72	3,87	2,69	0,42
10,784	0,04735	1,76E-03	1,702	5,643	25,8	996,79	8,77E-04	8,80E-07	91548,23	1,851	2,80	5,72	3,87	2,69	0,41
11,144	0,04735	1,76E-03	1,758	5,906	26,0	996,79	8,77E-04	8,80E-07	94602,62	1,815	2,80	5,72	3,87	2,69	0,40
11,574	0,04735	1,76E-03	1,826	6,313	24,4	997,20	9,11E-04	9,13E-07	94682,54	1,797	2,80	5,72	3,87	2,69	0,38
11,958	0,04735	1,76E-03	1,887	6,661	26,1	996,76	8,75E-04	8,78E-07	101745,81	1,777	2,80	5,72	3,87	2,69	0,37

Tabela A.2: Tabela de dados experimentais resultante dos ensaios com tubo liso para concentração média de 1,0%

Q (m ³ /h)	D(m)	A(m ²)	U(m/s)	$\frac{dp}{dx}$	T. Calib [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	u [m ² /s]	Re (Temp)	100 Darcy (Dp/Dx)	Incert. Re (%)	Incert. 100 Darcy (%)	Incert. $\frac{dp}{dx}$ (%)	Incert. U (%)	Conc.
7,996	0,047345	1,76E-03	1,262	3,890	26,4	996,68	8,69E-04	8,72E-07	68505,33	2,3217	2,80	5,72	3,87	2,69	1,3
8,398	0,047345	1,76E-03	1,325	4,069	25,1	997,02	8,95E-04	8,98E-07	69865,77	2,2006	2,80	5,72	3,87	2,69	1,2
8,813	0,047345	1,76E-03	1,391	4,239	27,2	996,46	8,53E-04	8,56E-07	76910,82	2,0830	2,80	5,72	3,87	2,69	1,2
9,213	0,047345	1,76E-03	1,454	4,549	27,3	996,43	8,51E-04	8,54E-07	80587,18	2,0457	2,80	5,72	3,87	2,69	1,1
9,609	0,047345	1,76E-03	1,516	4,732	27,9	996,26	8,39E-04	8,42E-07	85250,34	1,9565	2,80	5,72	3,87	2,69	1,1
10,413	0,047345	1,76E-03	1,643	5,371	26,9	996,54	8,59E-04	8,62E-07	90247,27	1,8901	2,80	5,72	3,87	2,69	1,0
10,814	0,047345	1,76E-03	1,706	5,724	27,0	996,52	8,57E-04	8,60E-07	93940,11	1,8680	2,80	5,72	3,87	2,69	0,9
11,195	0,047345	1,76E-03	1,766	5,975	27,5	996,38	8,47E-04	8,50E-07	98391,44	1,8198	2,80	5,72	3,87	2,69	0,9
11,546	0,047345	1,76E-03	1,822	6,344	27,4	996,40	8,49E-04	8,52E-07	101235,98	1,8165	2,80	5,72	3,87	2,69	0,9
11,963	0,047345	1,76E-03	1,888	6,587	27,9	996,26	8,39E-04	8,42E-07	106140,34	1,7570	2,80	5,72	3,87	2,69	0,9

Tabela A.3: Tabela de dados experimentais resultante dos ensaios com tubo liso para concentração média de 1,4%

Q (m ³ /h)	D(m)	A(m ²)	U(m/s)	$\frac{dp}{dx}$	T. Calib [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	u [m ² /s]	Re (Temp)	100 Darcy (Dp/Dx)	Incert. Re (%)	Incert. 100 Darcy (%)	Incert. $\frac{dp}{dx}$ (%)	Incert. U (%)	Conc.
8,055	0,047345	1,76E-03	1,271	4,132	27,4	996,40	8,49E-04	8,52E-07	70623,30	2,4310	2,80	5,72	3,87	2,69	1,7
8,458	0,047345	1,76E-03	1,335	4,170	27,2	996,46	8,53E-04	8,56E-07	73812,94	2,2248	2,80	5,72	3,87	2,69	1,6
8,810	0,047345	1,76E-03	1,390	4,149	26,9	996,54	8,59E-04	8,62E-07	76354,85	2,0398	2,80	5,72	3,87	2,69	1,6
9,256	0,047345	1,76E-03	1,461	4,302	28,9	995,98	8,19E-04	8,22E-07	84122,45	1,9174	2,80	5,72	3,87	2,69	1,5
9,614	0,047345	1,76E-03	1,517	4,349	30,1	995,62	7,95E-04	7,99E-07	89931,64	1,7975	2,80	5,72	3,87	2,69	1,4
10,381	0,047345	1,76E-03	1,638	5,449	26,2	996,73	8,73E-04	8,76E-07	88530,88	1,9293	2,80	5,72	3,87	2,69	1,3
10,807	0,047345	1,76E-03	1,705	5,808	24,7	997,12	9,04E-04	9,07E-07	89046,25	1,8968	2,80	5,72	3,87	2,69	1,3
11,143	0,047345	1,76E-03	1,758	6,046	26,1	996,76	8,75E-04	8,78E-07	94808,16	1,8580	2,80	5,72	3,87	2,69	1,2
11,543	0,047345	1,76E-03	1,821	6,473	27,0	996,52	8,57E-04	8,60E-07	100267,93	1,8541	2,80	5,72	3,87	2,69	1,2
11,903	0,047345	1,76E-03	1,878	6,658	25,4	996,94	8,89E-04	8,92E-07	99690,20	1,7927	2,80	5,72	3,87	2,69	1,2

Tabela A.4: Tabela de dados experimentais com fatores de atrito e velocidade crítica para concentração de 0,45%

Q (m ³ /h)	D(m)	A(m ²)	U(m/s)	$\frac{dp}{dx}$	T. Calib [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	u [m ² /s]	Re (Temp)	100 Darcy (Dp/Dx)	Fator de atrito teórico	Diferença entre fatores de atrito (%)	Conc.	Vel. crítica
8,071	0,04735	1,76E-03	1,274	3,543	24,7	997,12	9,04E-04	9,07E-07	66506,55	2,074	1,96	5,41	0,54	1,16
8,378	0,04735	1,76E-03	1,322	3,726	28,4	996,12	8,29E-04	8,32E-07	75223,04	2,027	1,91	6,22	0,52	1,16
8,801	0,04735	1,76E-03	1,389	4,080	25,7	996,87	8,83E-04	8,86E-07	74205,69	2,010	1,91	4,97	0,50	1,16
9,179	0,04735	1,76E-03	1,448	4,166	28,5	996,09	8,27E-04	8,30E-07	82614,72	1,888	1,86	1,29	0,48	1,17
9,609	0,04735	1,76E-03	1,516	4,598	27,1	996,49	8,55E-04	8,58E-07	83660,51	1,901	1,85	2,30	0,46	1,16
10,412	0,04735	1,76E-03	1,643	5,364	24,1	997,27	9,17E-04	9,20E-07	84565,52	1,887	1,85	1,82	0,42	1,16
10,784	0,04735	1,76E-03	1,702	5,643	25,8	996,79	8,77E-04	8,80E-07	91548,23	1,851	1,81	1,90	0,41	1,16
11,144	0,04735	1,76E-03	1,758	5,906	26,0	996,79	8,77E-04	8,80E-07	94602,62	1,815	1,80	0,71	0,40	1,17
11,574	0,04735	1,76E-03	1,826	6,313	24,4	997,20	9,11E-04	9,13E-07	94682,54	1,797	1,80	-0,22	0,38	1,16
11,958	0,04735	1,76E-03	1,887	6,661	26,1	996,76	8,75E-04	8,78E-07	101745,81	1,777	1,76	0,45	0,37	1,16

Tabela A.5: Tabela de dados experimentais com fatores de atrito para concentração de 1,0%

Q (m ³ /h)	D(m)	A(m ²)	U(m/s)	$\frac{dp}{dx}$	T. Calib [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	u [m ² /s]	Re (Temp)	100 Darcy (Dp/Dx)	Fator de atrito teórico	Diferença entre fatores de atrito (%)	Conc.	Vel. crítica
7,996	0,047345	1,76E-03	1,262	3,890	26,4	996,68	8,69E-04	8,72E-07	68505,33	2,3217	1,95	18,86	1,3	1,16
8,398	0,047345	1,76E-03	1,325	4,069	25,1	997,02	8,95E-04	8,98E-07	69865,77	2,2006	1,94	13,21	1,2	1,16
8,813	0,047345	1,76E-03	1,391	4,239	27,2	996,46	8,53E-04	8,56E-07	76910,82	2,0830	1,89	9,77	1,2	1,16
9,213	0,047345	1,76E-03	1,454	4,549	27,3	996,43	8,51E-04	8,54E-07	80587,18	2,0457	1,87	9,07	1,1	1,16
9,609	0,047345	1,76E-03	1,516	4,732	27,9	996,26	8,39E-04	8,42E-07	85250,34	1,9565	1,84	5,79	1,1	1,17
10,413	0,047345	1,76E-03	1,643	5,371	26,9	996,54	8,59E-04	8,62E-07	90247,27	1,8901	1,82	3,67	1,0	1,17
10,814	0,047345	1,76E-03	1,706	5,724	27,0	996,52	8,57E-04	8,60E-07	93940,11	1,8680	1,80	3,49	0,9	1,16
11,195	0,047345	1,76E-03	1,766	5,975	27,5	996,38	8,47E-04	8,50E-07	98391,44	1,8198	1,78	1,99	0,9	1,17
11,546	0,047345	1,76E-03	1,822	6,344	27,4	996,40	8,49E-04	8,52E-07	101235,98	1,8165	1,77	2,54	0,9	1,16
11,963	0,047345	1,76E-03	1,888	6,587	27,9	996,26	8,39E-04	8,42E-07	106140,34	1,7570	1,75	0,35	0,9	1,16

Tabela A.6: Tabela de dados experimentais com fatores de atrito e velocidade crítica para concentração de 1,4%

Q (m ³ /h)	D(m)	A(m ²)	U(m/s)	$\frac{dp}{dx}$	T. Calib [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	u [m ² /s]	Re (Temp)	100 Darcy (Dp/Dx)	Fator de atrito teórico	Diferença entre fatores de atrito (%)	Conc.	Vel. crítica
8,055	0,047345	1,76E-03	1,271	4,132	27,4	996,40	8,49E-04	8,52E-07	70623,30	2,4310	1,93	25,4	1,7	1,16
8,458	0,047345	1,76E-03	1,335	4,170	27,2	996,46	8,53E-04	8,56E-07	73812,94	2,2248	1,91	16,0	1,6	1,16
8,810	0,047345	1,76E-03	1,390	4,149	26,9	996,54	8,59E-04	8,62E-07	76354,85	2,0398	1,90	7,30	1,6	1,17
9,256	0,047345	1,76E-03	1,461	4,302	28,9	995,98	8,19E-04	8,22E-07	84122,45	1,9174	1,85	3,33	1,5	1,16
9,614	0,047345	1,76E-03	1,517	4,349	30,1	995,62	7,95E-04	7,99E-07	89931,64	1,7975	1,83	-1,49	1,4	1,18
10,381	0,047345	1,76E-03	1,638	5,449	26,2	996,73	8,73E-04	8,76E-07	88530,88	1,9293	1,83	5,31	1,3	1,16
10,807	0,047345	1,76E-03	1,705	5,808	24,7	997,12	9,04E-04	9,07E-07	89046,25	1,8968	1,82	3,69	1,3	1,16
11,143	0,047345	1,76E-03	1,758	6,046	26,1	996,76	8,75E-04	8,78E-07	94808,16	1,8580	1,80	3,17	1,2	1,16
11,543	0,047345	1,76E-03	1,821	6,473	27,0	996,52	8,57E-04	8,60E-07	100267,93	1,8541	1,77	4,41	1,2	1,16
11,903	0,047345	1,76E-03	1,878	6,658	25,4	996,94	8,89E-04	8,92E-07	99690,20	1,7927	1,77	0,80	1,2	1,16