UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

IGOR MATHEUS BENITES

**Investigação do comportamento do solo em torno de vazamentos em
sistemas de captação e distribuição de água**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2020

IGOR MATHEUS BENITES

**Investigação do comportamento do solo em torno de vazamentos em
sistemas de captação e distribuição de água**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e
Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Harry Edmar Schulz

São Carlos

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

BB467i Benites, Igor Matheus
Investigação do comportamento do solo em torno de vazamentos em sistemas de captação e distribuição de água / Igor Matheus Benites; orientador Harry Edmar Schulz. São Carlos, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

1. Escoamento em meio poroso. 2. Perdas de água. 3. Erosão do solo. 4. Detecção de vazamento. 5. . Desenvolvidos conceituais para vazamentos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **IGOR MATHEUS BENITES**.

Título da dissertação: "Investigação do comportamento do solo em torno de vazamentos em sistemas de captação e distribuição de água "

Data da defesa: 22/09/2020.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa

(Presidente Designado)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

(Universidade Federal do Ceará/UFC)

Aprovado

Prof. Dr. Alexandre Ixtarco da Silva

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Sorocaba)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. Eduardo Mario Mendonça

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Harry Edmar Schulz, pelo suporte durante o desenvolvimento deste trabalho. Sou grato, em especial, pela oportunidade de trabalhar com um profissional brilhante e de carreira exemplar ao qual me inspiro e tive a honra de aprender e trabalhar junto. Agradeço pela amizade e por toda a confiança depositada em mim.

Agradeço ao Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa pelo fundamental auxílio no decorrer de toda a pesquisa e pela gentileza ao conceder espaço em seu laboratório para a execução dos ensaios.

Agradeço, de forma singular, a minha namorada, Mariana Neves dos Santos, por todo o companheirismo, amor e apoio.

Agradeço, de forma especial, a minha mãe, Zenelda da Silva Araújo, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradeço aos meus irmãos Wélida da Silva Benites, Weliton Lucas da Silva Benites e Ivo Benites Junior por todo o companheirismo nas horas em que precisei.

Agradeço aos demais familiares Marta de Oliveira, Neide da Silva Araújo, Beatriz Agüero Gomes Benites, Elizeu Cavalcante Silva e Alex Jorge Mantovani.

Agradeço aos meus amigos Maikon Schmidt e Ericles Henrique pelo companheirismo que foram fundamentais nessa caminhada até aqui.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Os rios que eu encontro
vão seguindo comigo.
Rios são de água pouca,
em que a água sempre está por um fio.
Cortados no verão
que faz secar todos os rios.
Rios todos com nome
e que abraço como a amigos.
Uns com nome de gente,
outros com nome de bicho,
uns com nome de santo,
muitos só com apelido.
Mas todos como a gente
que por aqui tenho visto:
a gente cuja vida
se interrompe quando os rios”

João Cabral de Melo Neto (1953)

RESUMO

BENITES, I. M. **Investigação do comportamento do solo em torno de vazamentos em sistemas de captação e distribuição de água.** 2020. 151p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Os vazamentos observados em sistemas de distribuição de água implicam não apenas em perdas significativas de água, mas também na erosão do solo em volta da tubulação, havendo potencial risco à sustentabilidade do sistema como um todo. A detecção de pontos de vazamentos em redes de captação e distribuição de água é tema e inspiração de uma grande quantidade de estudos no cenário científico. Porém, a investigação do comportamento do solo em torno de vazamentos é um tópico ainda considerado recente e carente de métricas necessárias para compor um banco de dados amplo e acessível. É neste panorama que se insere a presente pesquisa, que buscou investigar a interação solo-vazamento por meio de uma investigação experimental do fenômeno da fluidização decorrente de um jato ascendente de água através de um orifício. Este jato tem a função de simular um vazamento que adentra a camada granular circundante à tubulação, que, no presente estudo, foi simulada de forma ideal por microesferas de vidro de diâmetro reduzido denominadas Ballotini. O método de investigação consistiu na utilização de uma configuração experimental desenvolvida com a finalidade de permitir a medição das distribuições de pressões excedentes (valores acima das pressões medidas em estado estático, isto é, antes da ocorrência da fluidização) e as velocidades geradas pelo fenômeno da fluidização interna. Além disso, a técnica PIV (Particle Image Velocimetry) foi empregada para a obtenção de campos de velocidades instantâneas com uma interferência mínima na ocorrência do fenômeno. São feitas ainda considerações acerca da geometria da região fluidizada associando-a a uma nova formulação teórica desenvolvida. Os resultados encontrados revelam que um estado permanente de recirculação ocorre na região próxima ao orifício de entrada, sendo que este estado impede que o vazamento aflore a superfície. Métricas e relações adimensionais para as características geométricas de cavidades provocadas no fenômeno da fluidização são apresentadas e foram avaliadas as influências de alguns parâmetros empíricos. Uma análise de sensibilidade sobre a influência da vazão de entrada e da altura da camada granular é apresentada.

Palavras-chave: Escoamento em meio poroso. Redes de distribuição. Perdas de água. Erosão do solo. Detecção de vazamento. Desenvolvimentos conceituais para vazamentos.

ABSTRACT

BENITES, I. M. **Investigation of soil behavior around leaks in water distribution systems.** 2020. 151p. Dissertação (Mestrado) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

Leaks observed in water distribution systems imply not only significant water losses, but also soil erosion around the pipeline, with a potential risk to the sustainability of the system. The detection of leakage points in water collection and distribution networks is the theme and inspiration of a large number of studies in the scientific field. However, the investigation of soil behavior around leaks is a topic still considered recent and there is a gap of the necessary metrics to compose a widely and accessible database. In this sense, the present aimed to investigate the soil-leak interaction through an experimental investigation of the fluidization process resulting from an upward water jet through an orifice. This jet simulates a leak that enters the granular layer that surrounds the pipe, which, in this study, was simulated by small diameter glass microspheres called Ballotini. The investigation method consisted of using an experimental apparatus developed with the purpose of allowing the measurement of excess pore pressure distributions (values above the pressures measured in a static state, in other words, before the fluidization) and the velocities generated by the phenomenon of internal fluidization. Furthermore, the Particle Image Velocimetry (PIV) technique was used to obtain instantaneous velocity fields with minimal interference in the occurrence of the phenomenon. Considerations about the geometry of the fluidized region were performed, relating them to a newly developed theoretical formulation. Results from the experiments revealed that a permanent state of recirculation occurs in the region close to the entrance orifice, where this condition restricts the leak from growing and reaching the bed surface. Metrics and dimensionless relations for the geometric characteristics of cavities caused by the fluidization phenomenon are presented, and the influences of some empirical parameters were evaluated. A sensitivity analysis of the influence on the inlet flow rate and the height of the granular bed is presented.

Keywords: Flow in porous media. Water losses. Soil erosion. Leak Detection. Conceptual developments for leaks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Microesferas de vidro utilizadas como solo ideal por Bailey e Van Zyl.	26
Figura 2 - Tipos de vazamento em redes de distribuição.	30
Figura 3 – Comparação entre as leis de Darcy (1856) e Forchheimer (1886).....	34
Figura 4 – Fases do fenômeno da Fluidização.	36
Figura 5 – Esquema do conjunto experimental utilizado por Van Zyl et al. (2013).	39
Figura 6 – Zoneamento da região fluidizada a diferentes vazões: a) 130L/h; b) 220L/h e c) 320L/h.....	40
Figura 7 – Esquema geral da técnica PIV.....	42
Figura 8 – Representação esquemática da geometria das imagens em PIV.....	43
Figura 9 – Metodologia de correlação cruzada em PIV.	45
Figura 10 – Histograma de análise e procura da região mais provável de deslocamento.	46
Figura 11 – Diagrama/Algoritmo de funcionamento básico do software MatPIV.....	48
Figura 12 – Geometrias adotadas para as situações 2-D e 3-D.	49
Figura 13 - a) Variáveis da formulação; b) Velocidades homogêneas (médias) nos limites do volume de controle (em cinza) e da cavidade com fluxo de recirculação; c) pressões excedentes homogêneas (médias) nos limites do volume de controle; d) Pressão hidrostática nos mesmos limites.	50
Figura 14 - Possível evolução do volume de controle (em cinza). Taxas de fluxo mais altas implicam valores maiores de αD (a altura da cavidade).	50
Figura 15 - Esboço da solução teórica da altura adimensional da cavidade com o crescimento do número de Froude. FF é o número de Froude acima do qual a cavidade da chaminé é formada.	55
Figura 16 - Aparato experimental (vista lateral).	60
Figura 17 – Esquema geral do aparato experimental.	60
Figura 18 - Principais componentes do tanque de vidro.	61
Figura 19 – Sistema de fornecimento de água.....	62
Figura 20 – (a) conexão com o ponto hidráulico do laboratório. (b) válvula reguladora de pressão. (c) rotâmetro e desaerador. (d) redução interna.....	63
Figura 21 – Tubos de Pitot tipo L e reto.....	65
Figura 22 – Sistema de posicionamento dos tubos de Pitot com indicação dos eixos de movimentação.....	66
Figura 23 – Unidade de fixação dos tubos de Pitot.	66

Figura 24 - Sistema utilizado para a medição das variações na carga de pressão após a fluidização.....	67
Figura 25 – Visão microscópica típica das microesferas de vidro utilizadas nos experimentos e sua comparação com uma amostra de areia.	68
Figura 26 – Distribuição granulométrica típica de microesferas de vidro Ballotini e areia. ...	69
Figura 27 – Planos e grid (malha) de medição utilizados.	70
Figura 28 – Determinação das coordenadas de referência: orifício lateral.....	71
Figura 29 – Representação da metodologia de medição.....	75
Figura 30 – Configuração do sistema PIV utilizado para determinação dos campos de velocidade.	79
Figura 31 – Vista lateral do esquema geral da configuração para a técnica PIV.....	80
Figura 32 – Código em MATLAB utilizado na geração de campos de velocidades instantâneas entre duas imagens consecutivas.....	81
Figura 33 - Dados experimentais referentes a vazão de 2 L/min.....	84
Figura 34 - Dados experimentais referentes a vazão de 4 L/min.....	84
Figura 35 - Dados experimentais referentes a vazão de 6 L/min.....	85
Figura 36 - Dados experimentais referentes a vazão de 8 L/min.....	85
Figura 37 - Resumo dos dados para obtenção da curva de calibração.....	86
Figura 38 - Curva de calibração obtida para o rotâmetro.	87
Figura 39 - Geometria da região fluidizada. (a) Vazão de 2 L/min. (b) Vazão de 3 L/min. (c) Vazão de 4 L/min. (d) Vazão de 5 L/min.	89
Figura 40 – Áreas da região fluidizada em contato com a parede do tanque.	90
Figura 41 - Alturas de fluidização.....	90
Figura 42 – Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 2 L/min.....	92
Figura 43 - Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 3 L/min.	92
Figura 44 - Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 4 L/m.....	92
Figura 45 – Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 5 L/min.....	93
Figura 46 - Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 6 L/min.	93
Figura 47 – Relação entre a razão de aspecto e altura adimensional da cavidade.....	95
Figura 48 – Máxima velocidade observada na zona móvel para as vazões de entrada e velocidade normalizada em relação a velocidade de entrada.	96
Figura 49 – Aspectos que interferem na determinação do fator dinâmico θ	97
Figura 50 – Relação entre a altura adimensional da cavidade gerada e o número de Froude.	98

Figura 51 – Análise de sensibilidade para a curva de predição da cavidade em relação ao fator θ	99
Figura 52 – Relação entre o fator e o Froude limite para uma cavidade estável.....	100
Figura 53 – Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 2 L/min.....	102
Figura 54 - Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 3 L/min.....	102
Figura 55 – Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 4 L/min.....	103
Figura 56 - Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 5 L/min.....	103
Figura 57 – Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 6 L/min.....	104
Figura 58 – Distribuição de pressão excedente para uma camada de 300 mm a uma vazão de 2 L/min.	105
Figura 59 – Envoltória estimada da geometria da região de fluidização para o orifício lateral. .	106
Figura 60 – Distribuição de velocidade ao longo da altura acima do orifício lateral.....	107
Figura 61 – Campo de velocidades e linhas de fluxo (corrente) para o orifício lateral.....	108
Figura 62 – Distribuição energia ao longo da altura acima do orifício lateral.	109
Figura 63 – Distribuição de pressão excedente para uma camada de 300 mm e vazão de 2L/min.	111
Figura 64 –Regimes de escoamentos em um leito fluidizado pela ação de um jato ascendente.	112
Figura 65 – Distribuição de velocidade para uma camada de 300 mm e vazão de 2 L/min. .	113
Figura 66 - Distribuição de energia excedente para uma camada de 300 mm e vazão de 2 L/min.	114
Figura 67 – Evolução da altura de fluidização de acordo com a vazão de entrada.	115
Figura 68 – Distribuição de pressão excedente para diferentes vazões de entrada.	116
Figura 69 – Distribuição de velocidade para diferentes vazões de entrada.....	117
Figura 70 - Distribuição de energia excedente para diferentes vazões de entrada.....	118
Figura 71 - Evolução da altura de fluidização mediante a variação da altura da camada granular.	119
Figura 72 - Distribuição de pressão excedente para diferentes alturas da camada granular. .	120
Figura 73 - Distribuição de velocidade para diferentes alturas da camada granular.....	121
Figura 74 - Distribuição de energia excedente para diferentes alturas da camada granular. .	122
Figura 75 – Ponta do tubo de Pitot tipo L posicionado dentro da região de fluidização.....	123
Figura 76 – Acúmulo de bolhas de ar na haste do tubo de Pitot.	124
Figura 77 – Rompimento da envoltória da região fluidizada.	125
Figura 78 – Esquema de experimento utilizando uma tubulação comercial.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índice de perdas na distribuição de água.....	24
Tabela 2 - Características das esferas de vidro Ballotini utilizadas	68
Tabela 3 - Exatidão do rotâmetro utilizado.	87
Tabela 4 – Razão de aspecto e altura adimensional da camada.	95
Tabela 5 - Parâmetros utilizados nas Equações de (35a) a (35e).	97
Tabela 6 – Desvio padrão máximo para os campos instantâneos médios de velocidade.	101
Tabela 7 – Esquema do método para a investigação dos fatores que afetam a fluidização. ..	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - balanço hídrico para caracterização de perdas	29
Quadro 2 – Exemplo de cálculo para um do grid (malha) de medição.	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Justificativa	25
1.2 Objetivos	27
1.2.1 Objetivos específicos	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Perdas em sistemas de abastecimento	29
2.2 Orifícios	31
2.3 Escoamento em meios porosos	32
2.3.1 Lei de Darcy – Escoamento laminar	33
2.3.2 Lei de Forchheimer – Escoamento turbulento	33
2.3.3 Equação de Ergun – Comportamento não linear	34
2.4 Fluidização	35
2.4.1 Velocidade mínima de fluidização	37
2.5 Fluidização interna: observações iniciais	38
2.6 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)	40
2.6.1 Terminologia na metodologia PIV	42
2.6.2 Fontes de iluminação	43
2.6.3 Análise de imagens – Correlação cruzada	44
2.6.4 Processamento das imagens - Software MatPiv	46
2.7 Equações governantes – Formulação teórica	49
2.7.1 Fenda no fundo do tanque - Escoamento em duas direções	51
2.7.1.1 Equação da continuidade	51
2.7.1.2 Equação da quantidade de movimento	52
2.7.1.3 Equação de energia	53
2.7.1.4 Previsão da evolução da cavidade	53
2.7.2 Orifício no fundo do tanque - Escoamento em três direções	55
2.7.2.1 Equação da continuidade	55
2.7.2.2 Equação da quantidade de movimento	56
2.7.2.3 Equação de energia	56
2.7.2.4 Previsão da evolução da cavidade	57
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 Conjunto experimental	59
3.1.1 Tanque de vidro	61
3.1.2 Sistema de fornecimento de água	62

3.1.3 Tubos de Pitot.....	64
3.1.4 Sistema de posicionamento dos tubos de Pitot	65
3.1.5 Tubo de visualização	67
3.1.6 Propriedades do solo - Ballotini	68
3.2 Metodologia experimental.....	69
3.2.1 Preparação para um experimento padrão	69
3.2.1.1 Grid (Malha) de medições.....	70
3.2.1.2 Coordenadas de referência para medições	71
3.2.1.3 Preparo da camada granular	72
3.2.1.4 Preparo dos tubos de Pitot.....	72
3.2.2 Procedimento experimental.....	73
3.2.2.1 Estabelecimento da vazão	74
3.2.2.2 Procedimento de medição	74
3.2.2.3 Medidas e cálculo de pressão e velocidade	75
3.2.2.4 Medidas das alturas de fluidização.....	78
3.3 Metodologia para a técnica PIV	79
3.3.1 Análise das imagens e geração dos campos instantâneos	80
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1 Calibração do rotâmetro	83
4.1.1 Resultados Experimentais	83
4.2 Vazão mínima para a formação da cavidade	88
4.3 Geometria da região fluidizada.....	88
4.4 Resultados na utilização da técnica PIV	91
4.4.1 Campos instantâneos de velocidade na zona móvel.....	91
4.4.2 Relação entre a razão de aspecto α e geometria da cavidade	94
4.4.3 Observações para formulação teórica mediante os resultados experimentais.....	96
4.4.4 Erros associados nas medições via PIV	100
4.5 Resultados experimentais: orifício lateral	104
4.5.1 Distribuição de pressão excedente	104
4.5.2 Distribuição de velocidade	106
4.5.3 Distribuição de energia excedente.....	109
4.6 Resultados experimentais: orifício central	110
4.6.1 Distribuição de pressões excedentes	110
4.6.2 Distribuição de velocidade	112
4.6.3 Distribuição de energia excedente.....	113

4.6.4	Análise de sensibilidade: influência da vazão de entrada.....	114
4.6.4.1	Altura de fluidização.....	114
4.6.4.2	Distribuição de pressão excedente	115
4.6.4.3	Distribuição de velocidade	116
4.6.4.4	Distribuição de energia excedente	117
4.6.5	Análise de sensibilidade: influência da altura da camada.....	118
4.6.5.1	Altura de fluidização.....	119
4.6.5.2	Distribuição de pressão excedente	119
4.6.5.3	Distribuição de velocidade	120
4.6.5.4	Distribuição de energia excedente	121
4.7	Outras observações	122
4.7.1	Perturbação causada pelos tubos de Pitot	122
4.7.2	Considerações acerca da estabilidade do leito fluidizado.....	124
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	127
5.1	Conclusões a respeito da técnica PIV	127
5.2	Conclusões sobre os resultados experimentais envolvendo tubos de Pitot e PIV	128
5.3	Recomendação de trabalhos futuros	129
5.3.1	Com relação à técnica PIV	129
5.3.2	Com relação ao equipamento experimental.....	130
6	REFERÊNCIAS.....	131
Apêndice A	– Caso 2-D: equação da continuidade	135
Apêndice B	– Caso 2-D: equação de momento.....	136
Apêndice C	– Caso 2-D: equação de energia.....	137
Apêndice D	– Caso 2-D: Previsão da evolução da cavidade	138
Apêndice E	– Caso 3-D: equação da continuidade	139
Apêndice F	– Caso 3-D: equação de momento.....	140
Apêndice G	– Caso 3-D: equação de energia.....	141
Apêndice H	– Caso 3-D: Previsão da evolução da cavidade	142
Apêndice I	- Resultados experimentais: orifício lateral	143
Apêndice J	- Resultados experimentais: orifício central.....	145

1 INTRODUÇÃO

Segundo relatório publicado em 2017 pela Organização Mundial de Saúde (OMS) juntamente com a Fundação das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) desde o ano 2000 aproximadamente 1 bilhão de pessoas passaram a ter acesso à água canalizada, porém cerca de 2,1 bilhões ainda vivem em regiões onde inexistem redes de abastecimento de água.

O cenário mundial atual mostra diversas crises hídricas onde os recursos são cada vez mais escassos. A projeção é que essa situação se agrave ainda mais em razão do aumento contínuo da demanda hídrica, uma vez que a população mundial aumenta exponencialmente, sendo a projeção populacional para 2050 de aproximadamente 9,8 bilhões de pessoas (UNITED NATIONS, 2017).

Tendo em vista o cenário mundial de crescimento da demanda hídrica, o controle de perdas em sistemas de tratamento e distribuição de água torna-se um tema extremamente relevante e objeto de várias pesquisas em diversas áreas do conhecimento, pois trata-se de um problema multidisciplinar (envolvendo, por exemplo, as engenharias hidráulica, geotécnica, de materiais e o saneamento) que pode ser explorado através de uma extensa variedade de técnicas e abordagens.

Para Stephens (2002) um sistema de abastecimento de água, como um todo, geralmente possui uma complexidade elevada vinculada às condições geométricas, topográficas, de armazenamento, de manutenção, de conexões, por exemplo, e que conduzem à probabilidade alta de perdas de rendimento e de faturamento. Além disso o autor afirma que seria impossível e excessivamente oneroso reduzir as perdas do sistema a zero.

Como já evidenciado pela apresentação do relatório da OMS, a gestão de perdas hídricas nos sistemas de abastecimento de água é tema de relevância não só no Brasil, mas em todo o mundo. Um exemplo fora das fronteiras brasileiras é a situação da cidade de Cape Town, África do Sul, onde iniciou-se, em 2015, uma grave crise hídrica resultando na iminente escassez de água na região. Como consequência, em 2018 a prefeitura anunciou o chamado “Dia Zero” onde o abastecimento de água municipal seria, em grande parte, desligado devido ao nível crítico das barragens (CITY OF CAPE TOWN, 2018). Um aumento da pluviosidade fez com que o “Dia Zero” fosse adiado, mas as medidas de economia de água continuam vigentes na cidade e na região.

No Brasil o cenário de perdas em redes de distribuição não é diferente. A média brasileira do índice de perdas na distribuição é de aproximadamente 40%, ou seja, a cada 100 m³ disponibilizado apenas 60 m³ chega realmente ao consumidor. A Tabela 1 apresenta o índice de perdas na distribuição por macrorregião. O índice representa a porcentagem de perdas em relação ao volume total produzido. O diagnóstico realizado pelo Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) aponta a região norte com o maior índice de perdas, com o estado de Roraima apresentando uma taxa de 75,4% de desperdício.

Tabela 1 - Índice de perdas na distribuição de água.

Macrorregião	Índice de Perda (%)
Norte	55,1
Nordeste	46,3
Sudeste	34,4
Sul	36,5
Centro-Oeste	34,1
Brasil	38,3

Fonte: SNIS (2017).

Essas elevadas perdas representam prejuízos financeiros e ambientais, uma vez que faz-se necessário uma produção maior para suprir o déficit gerado pela perda significativa de água. Além da perda hídrica, os vazamentos tendem a fragilizar e erodir o solo, danificando as estruturas de suporte dos sistemas de fornecimento, ou mesmo estruturas adjacentes como edificações ou pavimentos.

Ainda segundo o SNIS, as perdas no sistema de distribuição ocorrem, predominantemente, devido aos vazamentos em tubulações da rede de distribuição. Porém os vazamentos não podem ser diretamente observados, uma vez que a tubulação em um sistema de distribuição encontra-se, na grande parte de sua extensão, enterrada.

Van Zyl et al. (2013) expõe que o solo circundante às tubulações de água é um fator extremamente importante em estudos sobre vazamentos e representa um papel fundamental no gerenciamento de perdas.

Assim a investigação do comportamento do solo ao redor de vazamentos passou a ser tema de recentes pesquisas, entre elas podemos citar: Van zyl *et al.* (2013); Alsaydalani e Clayton (2014); Teeluckharry (2017); Tang *et al.* (2017); He *et al.* (2017), entre outros. A grande maioria desses estudos mostra que jatos de água, provenientes de vazamentos em

tubulações, pode causar um fenômeno chamado fluidização no solo ao redor do vazamento, desde que uma taxa de vazão suficiente seja atingida.

Alsaydalani e Clayton (2014) apontam que durante a ocorrência da assim denominada “fluidização” o meio granular ou leito é transformado do estado natural imóvel para um estado similar ao de um fluido, ou seja, fazendo com que o leito passe para o estado móvel. Os autores destacam ainda que a fluidização é um fenômeno largamente estudado na engenharia química para acelerar reações, porém poucos estudos foram dedicados à observação e explicação do comportamento de meios granulares sujeitos a escoamentos localizados.

1.1 Justificativa

Tendo em vista que o estudo do comportamento do solo em torno de vazamentos é um assunto recente em pesquisas e a fundamental importância do entendimento da interação solo-vazamento em sistemas de distribuição de água, essa pesquisa visa aprofundar os conhecimentos do fenômeno da fluidização decorrente de um jato ascendente de água através de um orifício.

Nessa conjuntura surgiu o projeto internacional de pesquisa intitulado *"Detecção de vazamentos e interação tubo-solo em sistemas de distribuição de água"* que envolveu inicialmente quatro instituições parceiras sendo elas a Universidade Federal do Ceará (UFC), a Universidade de São Paulo (USP), a University of Cape Town (UCT) da África do Sul e a Zhejiang University (ZJU) da China. Na sequência, o projeto passou a contar ainda com a participação da University of Auckland, da Nova Zelândia. O objetivo principal é o fortalecimento da cooperação internacional gerando conhecimento novo sobre o tema e sua divulgação a partir de diversas publicações e atividades conjuntas, sempre com os temas centrais de quantificação dos efeitos dos vazamentos no solo e de detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água. A presente pesquisa é parte integrante deste projeto.

Bailey e Van Zyl (2015) em seu artigo intitulado *"Experimental investigation of internal fluidisation due to a vertical water leak jet in a uniform medium"* realizaram um primeiro estudo experimental focado na fluidização local dos solos imediatamente circundantes a vazamentos em tubulações enterradas. Para isso, utilizaram um conjunto experimental, desenvolvido pelos próprios autores mencionados, na University of Cape Town, África do Sul, que consistia em um tanque de vidro preenchido com microesferas de vidro simulando um solo

ideal (Figura 1) submetido a um jato ascendente de água no centro do tanque, simulando assim, um jato proveniente de um vazamento em uma tubulação.

Figura 1 - Microesferas de vidro utilizadas como solo ideal por Bailey e Van Zyl.

Fonte: Bailey e Van Zyl (2015).

Considerando o contexto do projeto internacional *"Detecção de vazamentos e interação tubo-solo em sistemas de distribuição de água"*, no qual mais informações experimentais se mostraram necessárias para a continuidade das discussões, os pesquisadores componentes deste projeto internacional, Prof. Jakobus van Zyl, da University of Cape Town e Harry Edmar Schulz, da Universidade de São Paulo, acordaram em continuar a geração dessas informações. Nesse sentido, as pesquisas passaram a ser coordenadas pelo segundo pesquisador mencionado, sendo compartilhadas com o primeiro pesquisador mencionado e os demais componentes do grupo internacional de trabalho. Como consequência deste acordo, o conjunto experimental utilizado por Bailey e Van Zyl foi cedido para a presente pesquisa e estudos similares a serem coordenados no Brasil pelo segundo pesquisador mencionado.

Esta sequência de fatos faz com que essa pesquisa se baseie na utilização desse conjunto experimental, buscando obter mais resultados desta mesma configuração que possam corroborar os resultados anteriores (que ainda não haviam sido replicados) além de realizar diversos outros experimentos promovendo algumas variações de metodologia.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desse estudo é o entendimento do comportamento do solo ao redor de vazamentos em sistemas de distribuição de água. Para isso foram realizadas diversas variações de modelos experimentais buscando identificar e avaliar o impacto de parâmetros que afetam o escoamento no meio granular utilizado.

As principais medições realizadas foram as distribuições de pressões excedentes (valores acima das pressões medidas em estado estacionário, ou seja, antes da ocorrência da fluidização) e os campos de velocidade resultantes após a fluidização. Essas medições são fundamentais na calibração de modelos numéricos e na compreensão do fenômeno da fluidização local. Deste modo, são objetivos da pesquisa:

- a) Verificar as pressões excedentes geradas pela fluidização utilizando tubos de Pitot nos orifícios central e lateral;
- b) Calcular as velocidades e determinar os campos de velocidades nas regiões fluidizadas;
 - i. Calcular as velocidades através das medições de pressões excedentes com tubos de Pitot;
 - ii. Determinar os campos de velocidade utilizando a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), uma vez que a utilização do orifício lateral permite a visualização e obtenção de imagens do fenômeno da fluidização.
- c) Analisar as diferentes geometrias da região fluidizada utilizando diferentes vazões;
- d) Determinar: a vazão mínima para a ocorrência da fluidização; a vazão para qual a região fluidizada rompe a superfície da camada (erosão da camada);
- e) Averiguar a influência da altura da camada de solo no fenômeno da fluidização;

Além das alternativas experimentais citadas acima, essa pesquisa tem como propósito fazer um levantamento da literatura existente e avaliar o estado da arte sobre o entendimento da interação solo-vazamento.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos seguem aqueles apontados para o projeto geral, sendo que os seguintes tópicos podem ser apontados mediante ao fenômeno da fluidização.

- a) Estudar a interação solo/vazamento em solos estáveis com escoamento não recirculante;
- b) Estudar a interação solo/vazamento e a condição de primeira instabilização do escoamento com primeira expansão da matriz porosa;
- c) Estudar a interação solo/vazamento na condição estável expandida, com escoamento recirculante;
- d) Estudar a interação solo/vazamento e a condição da segunda instabilização do escoamento com tendência à erosão;
- e) Fornecer melhores avaliações das condições limítrofes que caracterizam as diferentes instabilizações;
- f) Interagir com os pesquisadores do exterior que estão atuando na mesma linha de estudo, visando a geração de textos em comum para publicações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perdas em sistemas de abastecimento

As perdas em sistemas de distribuição podem ser reais ou aparentes, sendo as perdas aparentes aquelas provenientes de erros na computação dos volumes utilizados e geralmente ocorrem devido a erro de medição em hidrômetros, ligações clandestinas, etc. (ABES, 2013).

As perdas reais, também ditas como perdas físicas, são aquelas que ocorrem no sistema de distribuição, ou seja, é a diferença entre o volume total disponibilizado para distribuição e o volume que chega aos consumidores (SNIS, 2017). O Quadro 1 apresenta o chamado “balanço hídrico” proposto pela International Water Association (IWA) para classificação das perdas de água em sistemas de distribuição.

Quadro 1 - balanço hídrico para caracterização de perdas

Volume de entrada no sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo Medido faturado (incluindo água importada)	Água faturada
			Consumo estimado não faturado	
		Consumo autorizado não faturado	Consumo Medido não faturado	Água não faturada
			Consumo estimado não faturado	
	Perda de água	Perdas aparentes	Consumo não autorizado	
			Erro de medição	
		Perdas reais	Vazamentos e extravasamentos em reservatórios	
			Vazamentos em adutoras e redes	
			Vazamentos em ramais	

Fonte: Adaptado de IWA - Hirner e Lambert (2000).

Os vazamentos reais na rede podem ser de três tipos, como exemplifica a Figura 2. No primeiro tipo os vazamentos são ditos inerentes e ocorrem geralmente em conexões, já o segundo tipo são os chamados vazamentos não-visíveis e não aflorantes à superfície. Por fim,

o terceiro tipo são os vazamentos visíveis aflorantes a superfície e são de fácil detecção, porém até o afloramento o solo circundante já experimentou um lento e duradouro período em que ocorreu o escoamento no meio poroso devido ao vazamento na rede.

Figura 2 - Tipos de vazamento em redes de distribuição.

Fonte: SABESP (2001).

Além de prejuízos econômicos, provenientes da perda de água e de possíveis danos às estruturas adjacentes, vazamentos não detectados representam problemas ambientais e possíveis danos à saúde pública (LI *et al.*, 2015). Fontanazza *et al.* (2015), por exemplo, conduziram análises experimentais para avaliar a intrusão de contaminantes através de aberturas/rachaduras em redes de abastecimento.

A rápida detecção e reparo de pequenos vazamentos tem sido um tópico muito abordado por indústrias e pesquisadores, verificando-se a descrição de diversos métodos de detecção na literatura, porém não existindo uma técnica universalmente consagrada, e cada uma apresentando vantagens e desvantagens para partes específicas do problema (GAMBOA-MEDINA, 2017).

A longo prazo vazamentos em redes de distribuição são inevitáveis e inerentes à própria existência da rede, uma vez que o desempenho das tubulações e conexões diminui com o passar dos anos. Trabalhos como este elaborado por Bailey e Van Zyl (2015), mostram que uma grande parcela dos vazamentos jamais aflora à superfície, formando assim uma região de recirculação interna no solo. O não afloramento à superfície e a ocorrência dessa recirculação, aliados à dificuldade da detecção (que idealmente deveria ser rápida), faz com que um vazamento menor possa ficar indetectável e ativo por um longo período de tempo. Assim, o entendimento e a investigação do comportamento do solo nessas situações pode ajudar no estabelecimento de métodos de averiguação na identificação e, eventualmente, na prevenção de vazamentos, na preservação do sistema e na proteção da infraestrutura urbana (HE *et al.*, 2017).

2.2 Orifícios

Orifícios são aberturas de perímetro fechado que geralmente possuem forma geométrica conhecida, que ocorrem ou são produzidas na parede ou fundo de um reservatório, pela qual o líquido em repouso ou em movimento escoar em virtude da energia potencial e/ou cinética que possui. A vazão de descarga pode ser determinada pela Equação (1) (PORTO, 2006).

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} \quad (1)$$

Q é a vazão descarregada pelo orifício; C_d é o coeficiente de descarga do orifício; A área da seção transversal do orifício; g é a aceleração da gravidade; h é lâmina ou altura d'água acima do eixo central do orifício (orifício livre) ou diferença de nível da água (orifício afogado).

A Equação (1) prevê que a vazão descarregada pelo orifício varia com a raiz quadrada da carga hidráulica, porém Alsaydalani e Clayton (2014) observaram que para vazões altas através de orifícios menores (0.33 e 0.62 mm) os dados experimentais se afastaram da lei dos orifícios.

Kabaasha (2018) expõe que em situações reais a área de abertura em vazamentos não é constante mas varia linearmente com a pressão e destaca que May (1994) apresentou uma expressão modificada para a descarga em situações de vazamentos (Equação (2)).

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + m h^{1.5}) \quad (2)$$

A_0 é a área inicial; m é o coeficiente angular que expressa a relação linear entre a área e a carga de pressão h . Diante disto, uma formulação alternativa é também utilizada para modelar o comportamento de vazamentos, na forma da Equação (3).

$$Q = C h^{N_1} \quad (3)$$

C é o coeficiente de descarga para vazamentos que apresenta valores distintos do coeficiente utilizado na Equação (1) e N_1 é o expoente de vazamentos/emissão que apresenta valores maiores que o valor teórico de 0.5 e varia entre 0.5 e 2.79 (LAMBERT, 2000; FARLEY e TROW, 2003). Tingchao Yu *et al.* (2019) apresenta um estudo experimental que avalia a influência da abertura em vazamentos para diferentes condições. Os autores demonstram que para tubos em escala real, o coeficiente de descarga pode apresentar valores relativamente diferentes dos apresentados na literatura clássica sobre o tema.

2.3 Escoamento em meios porosos

Segundo De Boer (2005) meios porosos são aqueles que possuem duas fases, sendo uma a fase sólida chamada de “matriz sólida” e um “vazio” que pode estar ocupado por uma ou mais fases fluidas (gases e/ou líquidos), ou seja, um material poroso é aquele que contém porosidade.

A porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios e volume da amostra.

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_T} \quad (4)$$

Para a caracterização dos regimes de escoamento em meios porosos, Martins (2006) afirma que é possível efetuar uma analogia ao escoamento em tubos cilíndricos, de modo que se definem zonas de escoamento linear e não-linear de forma análoga aos regimes laminar e turbulento nos tubos, respectivamente.

Em tubos cilíndricos a classificação é feita através do número de Reynolds (Re), o parâmetro adimensional que expressa a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas que regem o escoamento. O número de Reynolds para os escoamentos em meios porosos é geralmente denominado de número de Reynolds modificado e é expresso pela Equação (5) (HARKER, BACKHURST e RICHARDSON, 2013).

$$Re_1 = \frac{d_p}{(1 + \varepsilon)} \frac{\rho v}{\mu} \quad (5)$$

ρ densidade do fluido; d_p é o diâmetro médio das partículas; v é a velocidade superficial no meio (vazão dividida pela área transversal total do meio em consideração); μ é viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Reynolds fornece uma maneira de quantificar quando os efeitos inerciais se tornam significantes em relação aos viscosos. No Re convencional para tubos cilíndricos o escoamento passa a apresentar características significativamente turbulentas em valores acima da faixa de 2000 a 4000, conhecida como região de transição, ao passo que para o Re_1 a zona de transição (entre laminar e turbulento) varia entre os valores de 10 e 500 (HOLDICH, 2002).

2.3.1 Lei de Darcy – Escoamento laminar

Darcy (1856) desenvolveu a equação que descreve o escoamento através de um meio poroso, conhecida, devido a ele, como a “Lei de Darcy”. Para isso realizou experimentos para estudar as propriedades do escoamento da água através de uma camada de filtro de areia, concluindo que a vazão de escoamento é diretamente proporcional ao gradiente de pressão.

$$Q = K A \frac{\Delta H}{L} \quad (6)$$

Q é a vazão de escoamento; K é a assim denominada condutividade hidráulica ou coeficiente de Darcy e $\Delta H/L$ é o gradiente hidráulico. A Equação (6) também pode ser escrita em termos de velocidade e em termos de permeabilidade como mostra a Equação (7).

$$-\nabla p = \frac{\mu}{k} v \quad (7)$$

Onde k é a permeabilidade intrínseca do meio e $-\nabla p$ é o gradiente de pressão no leito.

2.3.2 Lei de Forchheimer – Escoamento turbulento

A equação de Darcy leva em conta a dominância das forças viscosas e exprime uma relação linear entre a velocidade do escoamento e o gradiente de pressão. Porém, como expõem Knappett e Craig (2012), à medida que a velocidade do escoamento aumenta a relação entre velocidade de escoamento e gradiente de pressão se torna não-linear. Duperret (1863) e Forchheimer (1886) propuseram um segundo termo quadrático, de modo a modelar, também, o escoamento não-linear.

$$-\nabla p = K_1 v + K_2 \rho v^2 \quad (8)$$

K_1 e K_2 são os coeficientes linear e quadrático de Forchheimer. O termo linear é evidentemente mantido com a denominação de Darcy e a Equação (8) é conhecida como equação de Forchheimer, sendo o coeficiente do termo não linear K_2 determinado por experimentos.

Observa-se que para velocidades relativamente baixas o termo quadrático tende a zero ($K_2 \rho v^2 \approx 0$). Como esperado, o valor de K_1 passa a ser igual a μ/k e a Lei de Forchheimer se torna idêntica à Lei de Darcy (LOFRANO, 2018).

A Figura 3 é uma representação esquemática que compara as proposições de Darcy e de Forchheimer.

Figura 3 – Comparação entre as leis de Darcy (1856) e Forchheimer (1886).

Fonte: Adaptado de Lofrano (2018).

2.3.3 Equação de Ergun – Comportamento não linear

Ergun (1952) também desenvolveu um modelo empírico para a queda de pressão total (Δp) ao longo de um comprimento (L) de um fluido escoando através de um leito ou meio poroso. Assim como já havia sido considerado por Forchheimer, Ergun admitiu que a queda de pressão total é a soma dos valores previstos pelas equações limites dos regimes laminar e turbulento, colocando em sua equação a soma dos termos de forças viscosas e de forças inerciais como termos lineares e quadráticos da velocidade, respectivamente (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). A Equação (9) mostra a equação completa proposta por Ergun (1952):

$$\frac{\Delta p}{L} = A \frac{\mu}{d_p^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} v + B \frac{\rho}{d_p} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} v^2 \quad (9)$$

Os parâmetros adimensionais A e B foram quantificados por Ergun, que sugeriu os valores 150 e 1.75 respectivamente. Porém, em várias situações esses valores podem ser não adequados para o meio poroso utilizado. A Equação de Ergun é largamente utilizada na engenharia química, sendo utilizada para avaliar a condutividade hidráulica nos meios porosos em teste (GIBILARO, 2001).

A Equação (9) é tida como válida para a região de transição dos regimes laminar e turbulento, ou seja, para Re_1 entre 10 e 1000. Para Re_1 abaixo de 10 (regime laminar) e porosidades inferiores a 0.5 considera-se a Equação (10) denominada de Equação de Blake-Kozeny (sendo mais conhecida como equação de Carman-Kozeny). Já para Re_1 acima de 1000 (escoamentos turbulentos) utiliza-se a Equação (11) conhecida como de Burke-Plummer.

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\mu}{d_p^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} v \quad (10)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = 1.75 \frac{\rho}{d_p} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} v^2 \quad (11)$$

O primeiro termo da Equação de Ergun é predominantemente para o regime linear, à medida que o segundo termo dá maior importância para as influências não-lineares (eventualmente turbulentas no meio-poroso) atingidas em valores mais elevados do número de Reynolds (MARTINS, 2006).

2.4 Fluidização

Gibilaro (2001) explica que a fluidização é o processo em que um leito de partículas sólidas, quando atravessado por um fluido (água ou gás) ascendente, tem a interação entre as partículas sólidas modificadas de tal modo que o estado do leito é transformado para um estado semelhante ao de um líquido. O fenômeno acontece quando um escoamento ascendente de fluido atravessa o leito com uma vazão ou velocidade superficial suficiente para exercer uma força sobre as partículas pelo menos igual ao peso das mesmas. Assim, o leito não se mantém mais fixo pela ação das forças de contato entre as partículas sólidas, mas adquire propriedades de deslocamento das mesmas como aquelas das moléculas de um fluido, de modo que as partículas são capazes de se mover relativamente livres umas das outras.

Kunii e Levenspiel (1991) explicam as fases do fenômeno da seguinte maneira:

- a) Para baixas vazões o fluido meramente percola entre os espaços vazios da matriz porosa estacionária, assim tem-se o estado de leito fixo (Figura 4a). Com o aumento da vazão as partículas oscilam em suas posições e se movem em regiões restritas transformando o leito fixo em um leito expandido.

- b) Com o estabelecimento de uma vazão ainda maior atinge-se um estado onde todas as partículas são suspensas devido à força ascendente aplicada pelo jato e podem se mover livremente umas em relação às outras. Esta é a condição do estado de fluidização mínima ou incipiente (Figura 4b).
- c) Um aumento da vazão suave acima daquela que causa a fluidização mínima geralmente resulta em uma expansão suave e gradativa do leito poroso. Em condições normais grandes instabilidades não são observadas. Neste estado a fluidização é dita como particulada ou suave (Figura 4c).
- d) A última fase é aquela onde se atinge a velocidade terminal (a força ascendente imposta pelo fluido iguala ou supera as forças contrárias ao movimento) e se inicia o transporte pneumático de partículas (Figura 4d), ou seja, as partículas são arrastadas para fora do leito com a água.

Figura 4 – Fases do fenômeno da Fluidização.

Fonte: Adaptado de Kunii & Levenspiel (1991).

Alsaydalani e Clayton (2014) definem a transformação de uma região dos solos granulares (material poroso) em um estado fluido como “fluidização interna”, em tradução livre. Em seu trabalho os autores concluem que a vazão, o tamanho das partículas do material granular, a altura do leito e a permeabilidade do material controlam o começo da fluidização,

pois entendem que esses parâmetros determinam as forças decorrentes da infiltração aplicadas ao leito.

2.4.1 Velocidade mínima de fluidização

Como descrito na introdução desta seção 2.4, tem-se o início da fluidização quando ocorre o equilíbrio entre a força promovida pelo fluxo ascendente (arraste e empuxo) e o peso do material granular, ou seja:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Queda} \\ \text{de pressão} \\ \text{através do leito} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Área da seção} \\ \text{transversal} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Volume} \\ \text{do leito} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Fração de} \\ \text{sólidos} \\ \text{no leito} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Peso} \\ \text{específico} \\ \text{do sólido} \end{array} \right)$$

$$(\Delta p) \cdot (A) = (A \cdot L) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot ((\rho_p - \rho) \cdot g) \quad (12)$$

Assim, a condição de mínima fluidização é dada por:

$$\frac{\Delta p}{L} = (1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho)g \quad (13)$$

ρ_p é a densidade do material das partículas. A velocidade superficial em condições de mínima fluidização, v_{mf} , é encontrada combinando as Equações (9) e (13), resultando na Equação (14). Ressalta-se que no início da fluidização a porosidade é maior que em um leito fixo, uma vez que o leito se encontra em estado expandido (RHODES, 1998).

$$\frac{1.75}{\varepsilon^3} \left(\frac{d_p \rho v_{mf}}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{d_p \rho v_{mf}}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2} \quad (14)$$

Ou ainda:

$$\frac{1.75}{\varepsilon^3} (Re_{mf})^2 + \frac{150(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} (Re_{mf}) = \frac{d_p^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2} \quad (15)$$

A segunda parte da Equação (15) é definida como o número de Arquimedes (Ar). Para o caso especial de partículas muito pequenas a Equação (14) é por vezes simplificada para:

$$v_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g}{150\mu} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \quad (16)$$

Nesse caso desprezou-se a parcela que envolve o quadrado do número de Reynolds, por envolver o quadrado do diâmetro da partícula. Entretanto este é um argumento que contradiz o seu próprio uso, porque o número de Arquimedes na equação (15) envolve a terceira potência do diâmetro da partícula, tendo então preferência na desconsideração por análise da ordem de grandeza. Além do mais, o resultado envolve o quadrado do diâmetro da partícula, que foi desprezado inicialmente devido à ordem de grandeza. Caso esta simplificação seja utilizada, é melhor restringi-la a baixas velocidades (números de Reynolds também pequenos) ao invés de partículas pequenas.

Kunii e Levenspiel (1991) salientam que a Equação (16) é válida apenas para $Re < 20$ (o que pode ser associado a baixas velocidades).

2.5 Fluidização interna: observações iniciais

Van Zyl et al. (2013) propuseram e executaram um experimento inicial no qual um leito granular ideal (microesferas de vidros) foi submetido a um jato ascendente proveniente de um orifício circular junto à parede de um reservatório de acrílico, o que permitiu a visualização e acompanhamento do fenômeno da fluidização. O aparato experimental consistia em um tanque retangular, um sistema de alimentação ligado ao orifício de entrada do tanque e tomadas de pressão distribuídas ao longo da parede frontal, como mostra a Figura 5.

Para produzir o jato ascendente foram utilizados orifícios de diâmetros variados (2,4 e 8 mm) localizados a uma distância de 2 milímetros da parede do tanque e que se alongavam, verticalmente, 98 milímetros para dentro do tanque. O sistema de alimentação era proveniente diretamente da rede pública e controlado através de uma válvula. As medições de pressão excedente (variações medidas em relação à pressão hidrostática) foram aferidas através de vários furos com 1 mm de diâmetro na parede frontal do tanque. Essas aberturas foram utilizadas como tomadas de pressão, sendo indicadas no esquema da Figura 5, nas quais foram inseridas agulhas hipodérmicas de 0,9 milímetros de diâmetro interno conectadas a tubos de visualização nos quais a variação do nível de água podia ser medida.

Figura 5 – Esquema do conjunto experimental utilizado por Van Zyl et al. (2013).

Fonte: Adaptado de Van Zyl et al (2013).

Um dos objetivos do estudo era a visualização do fenômeno da fluidização e, consequentemente, a caracterização da região fluidizada. Os resultados obtidos em uma das configurações do estudo são apresentados na Figura 6 e o assim denominado “zoneamento” da região fluidizada, conforme o entendimento dos autores originais, é descrita abaixo.

- a) Zona fluidizada: Zona interna onde as partículas são transportadas, em alta velocidade, da saída do orifício até o fim do jato, terminando seu movimento em um vórtice que retorna à base.
- b) Zona móvel: As partículas se movem de forma lenta, desde o topo da zona fluidizada até o orifício. Observou-se que essa zona circunda a zona fluidizada por completo.
- c) Zona estática: zona externa onde as partículas não são afetadas pelo jato ascendente.

Figura 6 – Zoneamento da região fluidizada a diferentes vazões: a) 130L/h; b) 220L/h e c) 320L/h.

Fonte: Van Zyl et al. (2013).

O estudo conclui que a fluidização interna age como um mecanismo de dissipação de energia e aponta que o perfil de pressões excedentes cresce de acordo com a altura acima do orifício até alcançar o topo da zona fluidizada, passando então a reduzir novamente.

2.6 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)

A compreensão dos mecanismos que regem os escoamentos é fundamental para o entendimento dos fenômenos dos escoamentos como um todo. Nas mais diversas áreas que se ocupam com fluidos, a obtenção dos campos de velocidade das massas em movimento é essencial para caracterizar, classificar e entender os processos de um determinado fenômeno sujeito ao campo de velocidades. Na literatura existem variadas técnicas para a obtenção de campos de velocidade, bi ou tridimensionais, que podem ser separadas em dois grandes grupos: “técnicas intrusivas” e “técnicas não intrusivas” (SOMMER, 2018).

Como se evidencia no próprio nome, as técnicas intrusivas de algum modo interferem no escoamento e, para determinados casos, uma interferência, mesmo que mínima, se torna deveras prejudicial e pode conduzir a erros na determinação dos campos de velocidade realmente atuantes na ausência do equipamento de medição. Warner e Smith (2014) salientam que recentemente têm surgido diferentes técnicas não intrusivas e, dentre elas, destaca-se o

método denominado em Inglês de “Particle Image Velocimetry” (PIV), tendo a tradução mais evidente de “Velocimetria por Imagens de Partículas”.

Através da técnica PIV pode-se obter campos de velocidade instantâneos (bi ou até mesmo tridimensionais) através do acompanhamento do deslocamento de partículas contidas no escoamento em observação. O princípio utilizado é relativamente básico e consiste na utilização de câmeras digitais de alta resolução e alta velocidade para captura de imagens consecutivas da região de interesse do escoamento, que é iluminada por uma fonte de luz externa (ADRIAN e WESTERWEEL, 2011).

Um par de imagens sucessivas é inicialmente capturado e armazenado, sendo posteriormente essas imagens analisadas com o uso de softwares de processamento que utilizam procedimentos estatísticos para o cálculo das velocidades instantâneas. Através da criação de uma malha sobreposta às imagens obtém-se a localização das partículas em cada uma das imagens e, conseqüentemente, obtém-se também a distância percorrida por uma partícula através da correlação entre as duas imagens. Tendo a distância percorrida por uma determinada partícula juntamente com o tempo registrado pela câmera entre duas capturas consecutivas (subentendido como um tempo pequeno) pode-se representar a velocidade para aquele intervalo de tempo através da equação básica para o regime permanente, expressa vetorialmente pela Equação (17) e entendida como a velocidade “instantânea” da partícula (RAFFEL, WILLERT e KOMPENHANS, 1998).

$$(u, v) = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) \quad (17)$$

u e v são as componentes horizontal e vertical da velocidade instantânea de cada partícula no escoamento; Δx e Δy as distâncias percorridas pela partícula nas respectivas direções e Δt o intervalo de tempo entre duas imagens consecutivas.

A Figura 7 mostra o esquema geral da técnica PIV.

Figura 7 – Esquema geral da técnica PIV.

Fonte: Adaptado de Raffel, Willert e Kompenhans (1998) e Sommer (2018).

Conforme o tipo de escoamento e a densidade de partículas contidas na região de interesse escolhe-se o método de correlação das imagens a ser utilizado. Como exemplos mencionam-se a correlação cruzada, o rastreamento de partículas e a auto correlação. O método escolhido deve sempre visar a melhor maneira de obter os campos de velocidade de acordo com as características do escoamento (LIMA, 2003).

2.6.1 Terminologia na metodologia PIV

Algumas definições e a terminologia na técnica PIV podem facilmente causar uma grande confusão. Raffel, Willert e Kompenhans (1998) apresentam uma terminologia considerada bastante clara e eficaz, utilizada no presente texto. A Figura 8 mostra um esquema onde se apresentam as diferentes definições dos vários componentes da técnica.

Na Figura 8 “light plane”, ou “plano de luz”, refere-se de fato ao “volume” de fluido iluminado pela fonte de luz (de pequena espessura). Já o termo “Image plane”, ou “plano da imagem”, é a imagem capturada deste volume. O plano da imagem é uma representação 2D do espaço, enquanto que o plano de luz é um “volume”, ou seja, uma porção 3D do espaço, ainda que de espessura reduzida.

O sub volume selecionado no plano de luz é denominado “Interrogation volume”, ou “volume de interrogação”. A “Interrogation area”, ou área de interrogação, é a porção correspondente do volume de interrogação capturada e representada no plano da imagem.

Figura 8 – Representação esquemática da geometria das imagens em PIV.

Fonte: Raffel, Willert e Kompenhans (1998).

2.6.2 Fontes de iluminação

A principal função do sistema de iluminação é dar destaque à região de interesse no escoamento, ou seja, à iluminação cumpre o papel de realçar as partículas suspensas que seguem o movimento do fluido, possibilitando uma adequada resolução de captura das imagens em alta velocidade. Entre as diversas fontes que podem ser utilizadas estão as lâmpadas de halogênio, fluorescentes e de vapor de mercúrio ou até mesmo a luz natural (WARNER E SMITH, 2014).

Adrian e Westerweel (2001) expõem que na utilização da técnica PIV para determinação dos campos de velocidade instantânea o sistema de iluminação é primordial. Os autores salientam ainda que quanto mais potente a fonte de luz, imagens mais nítidas e precisas serão obtidas, o que é essencial para o posterior processamento e obtenção das velocidades.

2.6.3 Análise de imagens – Correlação cruzada

Após a captura e registro das imagens sucessivas (frames) da região de interesse no escoamento, a próxima etapa é o processamento e análise dessas imagens com a finalidade de avaliar os deslocamentos das partículas e calcular os campos de velocidade resultantes. Na grande maioria dos estudos realizados a densidade de partículas nas imagens capturadas é alta, assim uma abordagem euleriana, ou seja, um acompanhamento de partículas isoladas para a determinação de seu deslocamento, torna-se inviável (TOMING, 2010). Isso decorre da necessidade de determinar a posição sequencial de cada partícula individualmente em meio a uma população que também se movimenta.

Warner e Smith (2014) apontam que, para contornar esse problema, estuda-se o deslocamento de uma quantidade de partículas em uma pequena região na imagem e presume-se que, em consequência do pequeno tamanho dessa região, a distância relativa entre duas partículas, no intervalo de tempo considerado, mantém-se constante. Essa pequena região considerada da imagem é a denominada área de interrogação, que possui um tamanho pequeno de pixels (e.g. 16x16, 32x32, 64x64) em relação ao tamanho total da imagem analisada (e.g. 1280x720, 640x360).

Uma metodologia que permite o “acompanhamento” do deslocamento de partículas em uma determinada área de interrogação é a correlação cruzada, que utiliza duas imagens consecutivas do escoamento para determinar o campo de velocidade. O método é capaz de fornecer o módulo, a direção e o sentido de cada vetor que constitui o campo de velocidade (LIMA, 2003).

A Figura 9 apresenta um esquema geral dos procedimentos realizados na correlação cruzada. Primeiramente duas imagens sucessivas são capturadas do escoamento, uma no tempo t e outra após um intervalo de tempo dt (Figura 9a). Através da criação de um grid (malha de posicionamento i, j) as imagens são divididas em pequenas áreas de interrogação ou “janelas de interrogação” cujos tamanhos são definidos em pixels (Figura 9b). Cada janela de interrogação contém uma distribuição de partículas em seu interior. Em seguida, o algoritmo seleciona uma janela na primeira imagem que contém o ponto no qual se deseja calcular a velocidade, registrando a sua distribuição de partículas. Posteriormente a mesma janela é selecionada na segunda imagem, procurando-se nesta a distribuição inicial de partículas. Em cada janela é possível determinar o deslocamento mais provável do conjunto de partículas correlacionando-se as posições sucessivas das partículas. Note-se que em termos visuais pode não haver dúvidas ao observador qual partícula da primeira imagem corresponde àquela da

segunda imagem, porém o algoritmo não “vê” e é preciso lançar mão das correlações cruzadas para que a maior correlação permita decidir pelo deslocamento mais provável do conjunto de partículas naquela janela de interrogação. Por fim, com os deslocamentos mais prováveis (melhor correlacionados) em cada janela de interrogação e, possuindo o intervalo de tempo dt entre imagens sucessivas, determina-se o vetor velocidade correspondente a cada janela (Figura 9d).

Figura 9 – Metodologia de correlação cruzada em PIV.

Fonte: Amaral e Castilho (2012).

Em resumo, na correlação cruzada a mesma distribuição de partículas contidas na janela de interrogação da primeira imagem é procurada na mesma janela de interrogação da segunda imagem, em seu plano cartesiano de coordenadas (Figura 9c). É então gerado um histograma que expressa picos de correlação para aquela janela, sendo que o maior pico determina a velocidade mais provável na janela procurada (este pico representa a correlação cruzada que melhor representa o deslocamento conjunto das partículas na janela). A análise considera a possibilidade de entrada de novas partículas e de saída de partículas pelas bordas da janela, sendo a análise estatística da melhor correlação para o conjunto uma necessidade para este tipo

de medida. Esta operação é efetuada em todas as janelas de interrogação do plano em análise, assim pode-se determinar o deslocamento das partículas e, conseqüentemente, a velocidade instantânea a ser atribuída a cada pequena região (WIENEKE, 2017).

A Figura 10 apresenta um esquema bastante didático da evolução dos processos na correlação cruzada. Sommer (2018) ressalta que o processo de procura através de algoritmos desenvolvidos e aplicados nos mais diversos softwares exige esforço computacional relativamente alto de acordo com o tamanho das imagens analisadas e a densidade de partículas em cada janela de interrogação.

Figura 10 – Histograma de análise e procura da região mais provável de deslocamento.

Fonte: Wieneke (2017).

2.6.4 Processamento das imagens - Software MatPiv

Nos últimos anos muitos algoritmos vêm sendo implementados em softwares que utilizam a correlação cruzada para a determinação de campos instantâneos de velocidade. Dentre eles podemos destacar: MatPIV, UralPIV, OpenPIV, VidPIV, entre outros. Os três primeiros são códigos desenvolvidos em MATLAB® e são softwares de código aberto para fins educacionais. Para a presente pesquisa utilizou-se o software MatPIV para a obtenção de campos de velocidade.

O MatPIV, na sua versão mais recente (1.7), é uma ferramenta aplicada em ambiente MATLAB® que utiliza algoritmos, ou funções, para determinação dos campos de velocidade através da técnica PIV. Por se tratar de software livre, ou seja, de código aberto, permite a modificação e adaptação dos códigos e funções, o que dá a esta ferramenta maior versatilidade para a utilização em diferentes aplicações.

O algoritmo básico de funcionamento do software é descrito a seguir e a Figura 11 apresenta um diagrama do funcionamento geral do software:

- a) **Determinação de um sistema de coordenadas:** processo para determinar o tamanho de cada pixel nas imagens. Isso pode ser feito através da inserção de um grid (tela ou malha) de pontos na imagem capturada para calibração do experimento. Através da utilização de uma função disponível no pacote, insere-se o sistema de coordenadas (em centímetros) e sua orientação.
- b) **Aplicação de uma máscara a regiões de não interesse:** marcação de regiões onde não se interessa a aplicação do PIV. Ou seja, regiões onde não há interesse de obtenção das velocidades.
- c) **Cálculo das velocidades:** processo para calcular as velocidades a partir das imagens fornecidas. Apresenta-se a sintaxe da função MatPIV:

$$[x,y,u,v] = \text{matpiv}(\text{image1}, \text{image2}, \text{windowsize}, Dt, \text{WinOverlap}, \text{Method}, \text{worldcoordfile}, \text{maskfile})$$

Onde:

- i. *image1* e *image2* são as imagens a serem correlacionadas;
 - ii. *windowsize* é o tamanho da janela de interrogação a ser utilizada;
 - iii. *Dt* é o tempo de separação entre as imagens (depende da velocidade de captura das imagens da câmera utilizada);
 - iv. *WinOverlap* é um número entre 0 e 1 que estabelece a sobreposição das áreas de interrogação;
 - v. *Method* especifica o método utilizado na performance do PIV. No manual do programa são listados alguns métodos possíveis de serem utilizados;
 - vi. *Worldcoordfile* especifica o nome do arquivo que foi gerado na determinação do sistema de coordenadas;
 - vii. *Maskfile* especifica o nome do arquivo que contém a máscara criada no passo 2. Ou seja, especifica as regiões onde não há interesse na obtenção das imagens.
- e) **Aplicação de filtros:** após o cálculo das velocidades, normalmente, faz-se uso de alguns filtros para remover os chamados “outliers” (pontos fora da amostra):

- i. **Signal-to-Noise ratio (SnR):** (razão entre sinal real e ruído de fundo) utilizado na validação do campo vetorial através da relação SnR. Todos os vetores de velocidade considerados “inválidos” (com um SnR abaixo do limite, ou seja, cujo sinal real se confunde com o ruído de fundo) são substituídos por um “não número” (não pode ser computado).
 - ii. **Global histogram operator:** é um operador que removerá vetores que são significativamente maiores ou menores que a maioria (pontos fora da amostra para este estágio do cálculo).
 - iii. **Local filter:** filtra as velocidades com base na diferença quadrática entre os vetores de velocidade individuais e a mediana, ou a média, de seus vizinhos circundantes. Basicamente, esse filtro determina que um vetor não pode ser “muito diferente” de seus vizinhos (pontos fora da amostra para este estágio do cálculo).
 - iv. **Interpolate outliers:** responsável pela interpolação linear dos vetores. Este filtro classifica os vetores com base no número de vizinhos “outliers” e começa interpolando os vetores com o menor número possível desses vizinhos.
- f) **Campos de vetores de velocidade:** são gerados campos instantâneos de velocidade nas formas de campos vetoriais. A exibição dos resultados se dá através de matrizes (que podem ser exportadas em formatos mais acessíveis como por exemplo .xls, formato conhecido para planilhas eletrônicas) ou de diagramas que mostram os campos vetoriais com seus respectivos módulos, direção e sentido.

Figura 11 – Diagrama/Algoritmo de funcionamento básico do software MatPIV.

2.7 Equações governantes – Formulação teórica

A formulação teórica apresentada nesta seção foi cedida à presente pesquisa através de um manuscrito elaborado pelo orientador responsável pelo estudo, Prof. Tit. Harry Edmar Schulz. Ressalta-se que os resultados obtidos neste trabalho e a formulação teórica elaborada são complementares e fazem parte de um mesmo projeto.

A análise teórica básica foi realizada utilizando os princípios de conservação de massa, momento e energia em sua forma integral, para escoamento uniforme nas cavidades. Duas situações geométricas foram consideradas e estão esquematizadas na Figura 12. Para a situação 2-D, a Figura 12a mostra uma fenda no fundo de um tanque contendo água e material particulado. Através desta fenda, a água é injetada, formando uma cavidade ao longo de toda a largura do tanque, possuindo, de maneira ideal, uma geometria cilíndrica com uma base aproximadamente elíptica a circular. Para um cenário 3-D, a Figura 12b mostra um orifício no fundo de um tanque que induz a formação de uma cavidade, que possui, de forma ideal, uma forma de volume aproximadamente de elíptica a esférica.

A Figura 12 mostra a geometria simplificada dos volumes de controle adotados para ambas as situações e a Figura 13 apresenta as variáveis consideradas homogêneas na superfície de controle. As geometrias das cavidades, 2-D e 3-D, foram consideradas como volumes cilíndricos, o primeiro com base retangular e o segundo com base circular. Este procedimento evita complicações desnecessárias de cálculo.

Figura 12 – Geometrias adotadas para as situações 2-D e 3-D.

Fonte: Schulz *et al.* (2020).

Figura 13 - a) Variáveis da formulação; b) Velocidades homogêneas (médias) nos limites do volume de controle (em cinza) e da cavidade com fluxo de recirculação; c) pressões excedentes homogêneas (médias) nos limites do volume de controle; d) Pressão hidrostática nos mesmos limites.

Fonte: Schulz *et al.* (2020).

A Figura 14 mostra as formas possíveis do volume de controle (em cinza) para diferentes taxas de vazão injetadas através da fenda ou orifício.

Figura 14 - Possível evolução do volume de controle (em cinza). Taxas de fluxo mais altas implicam valores maiores de αD (a altura da cavidade).

Fonte: Schulz *et al.* (2020).

Na Figura 14, o fator geométrico ou razão de aspecto α (razão entre a altura da cavidade e sua largura) pode ser uma função da dimensão D . A abordagem através do ponto de vista de volume de controle adotada não levou em consideração as características geométricas do

material granular, ou seja, o diâmetro das partículas e sua esfericidade. Deste modo, ajustes podem ser necessários após a obtenção das equações governantes para a evolução da cavidade.

As Equações (18), (19), (20) são as equações de massa, quantidade de movimento e energia, respectivamente, para a situação de regime uniforme.

$$\int_{cs} \rho V \cdot dA = 0 \quad (18)$$

$$F = \int_{cs} V \rho V \cdot dA \quad (19)$$

$$Q - W = \int_{cs} \left(\frac{V^2}{2} + zg + \frac{p}{\rho} \right) \rho V \cdot dA \quad (20)$$

2.7.1 Fenda no fundo do tanque - Escoamento em duas direções

2.7.1.1 Equação da continuidade

A equação de conservação de massa (18) fornece, para condições homogêneas das Figura 12a e Figura 13, os resultados (apêndice A):

$$V_B = V_o \frac{W^*}{h} \frac{\alpha}{(1 + 2\alpha)} \quad (21)$$

$$V_E = V_o \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right) \frac{W^*}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]} \quad (22a)$$

$$V_E = V_B \frac{h}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]} \quad (22b)$$

Onde V_o é a velocidade na fenda; V_B é a velocidade da água que sai da cavidade e V_E é a velocidade da água que deixa o volume de controle na matriz porosa. W^* é a largura adimensional da fenda, dada por $W^* = W/H$, onde W é a largura da fenda e H é a profundidade da camada (Figura 14a). h é a altura adimensional da cavidade, dada por $h = \alpha D/H$, onde D é a dimensão horizontal do volume de controle e α é a razão de aspecto da cavidade (Figura 13).

Da equação de continuidade:

$$Q = V_B A_B + V_E A_E \quad (23)$$

Onde Q é a vazão que permeia o volume de controle na matriz porosa. A_B é a área da parte inferior do volume (área de entrada no volume) e A_E é a área de saída ou saída do volume.

2.7.1.2 Equação da quantidade de movimento

A equação de conservação da quantidade de movimento (19) fornece, para as condições das Figura 12a e Figura 13, o seguinte resultado para a diferença das pressões excedentes médias normalizadas $\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H}\right)$ (apêndice B):

$$\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H}\right) = Fr^2 \left\{ \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha}\right)^2 \frac{W^{*3}}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]^2} - \frac{W^{*3}}{h^2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha}\right)^2 - \alpha \theta \frac{W^{*2}}{h} \right\} + \rho^* (1 - h) + 2\alpha \frac{\tau^*}{h} (1 - h) \quad (24)$$

Onde ρ é a densidade da água, ρ^* é a densidade relativa da mistura solo-água, dada por $\rho^* = \rho_M / \rho$, onde ρ_M é a densidade da mistura; g é a aceleração da gravidade; θ é um fator dinâmico para a colisão do jato na parte inferior do volume de controle; p_B e p_E são as pressões excedentes na entrada e saída do volume de controle, respectivamente.

A tensão de cisalhamento normalizada nas paredes laterais, τ^* , é dada por:

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g H} \quad (25)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento. Fr é o número de Froude de entrada que consiste no adimensional definido como:

$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gW}} \quad (26)$$

2.7.1.3 Equação de energia

A equação de conservação de energia (20) fornece, para as condições das Figura 12a e Figura 13, um resultado adicional para a diferença das pressões excedentes médias normalizadas $\left(\frac{P_B - P_E}{\rho g H}\right)$ (ver apêndice C):

$$\begin{aligned} \frac{P_B - P_E}{\rho g H} = & \frac{F_r^2}{2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 \left\{ \frac{W^{*3}}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]^2} - (-K_1 + 1) \frac{W^{*3}}{h^2} \right\} + \frac{K_2}{2} F_r \frac{W^{*3/2}}{h} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right) - \\ & - \left[h + H_W^* + \rho^*(1 - h) \right] + \frac{h}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]} \left\{ \left(1 + H_W^* \right) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h) (H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

Onde K_2 e K_1 são os coeficientes das parcelas quadrática e linear da equação de Forchheimer, expressos em forma adimensional. Eles são usados para calcular a queda de pressão média (perda de carga) entre as seções de entrada e saída do volume de controle (consulte o apêndice C). H_W^* é a altura adimensional da água acima do leito de areia, dada por $H_W^* = H_W/H$, onde H_W é a altura da água.

2.7.1.4 Previsão da evolução da cavidade

As equações (24) e (27) fornecem a equação que expressa a dependência entre a altura normalizada da cavidade, h , e o número de Froude da fenda, Fr . Assim, obtém-se (apêndice D):

$$A F_r^2 + B F_r + C = 0 \quad (28a)$$

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 \frac{W^{*3} h^2}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 (1 + K_1) W^{*3} - \alpha \theta W^{*2} h \quad (28b)$$

$$B = -\frac{K_2}{2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right) W^{*3/2} h \quad (28c)$$

$$C = 2\alpha \tau^* h(1 - h) + h^2(1 - h) \left\{ \frac{\rho^* [3\alpha + h(2 - 3\alpha)] - [\alpha + h(1 - \alpha)]}{2\alpha + h(1 - 2\alpha)} \right\} \quad (28d)$$

$$Fr = -\frac{B}{2A} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4A^2} - \frac{C}{A}} \quad (28e)$$

A solução obtida é um polinômio de 5ª ordem de h , para o qual nenhuma solução geral é conhecida. Mas é também uma função quadrática do número de Froude, sendo esta de fácil solução, de modo que é possível expressar Fr como uma função de h de maneira bijetiva, permitindo representar graficamente h como uma função de Fr de maneira simples.

A solução para a dependência entre h e Fr dada pelas equações de (28a) a (28e) envolve os seguintes parâmetros:

- a) A largura normalizada da fenda, H_W^* ;
- b) A tensão de cisalhamento normalizada nas superfícies laterais, τ^* ;
- c) A densidade relativa entre a mistura sólido-água, ρ^* ;
- d) O coeficiente quadrático adimensional de Forchheimer, K_2 ;
- e) O coeficiente de Forchheimer linear adimensional, K_1 ;
- f) A relação de aspecto da cavidade, α (esse fator pode ser uma função de h);
- g) O fator dinâmico para colisão do jato na parte inferior do volume de controle, θ ;
- h) A equação de Forchheimer pode ser comparada à equação de Ergun com termos quadráticos e lineares, mostrando que K_1 e K_2 dependem das características da matriz porosa (ERGUN, 1952; ZHANG et al., 2018).

A altura da água, H_W , acima do leito não aparece como variável relevante para quantificação da cavidade. As pressões excedentes (consideradas homogêneas nas superfícies de entrada e saída) foram suprimidas igualando suas expressões para as equações de quantidade de movimento e de energia, de modo que elas também não são relevantes para a quantificação da cavidade.

As equações (28a-e) permitem esboçar a forma geral da dependência entre Fr e h , como mostrado na Figura 15. Esta figura mostra que, para um número de Froude em crescimento contínuo, a cavidade atinge uma altura máxima estável em um número de Froude F_F , denominado aqui o número de Froude de Fluidização Total. A parte inferior do gráfico (linha sólida) é a solução fisicamente alcançável desta formulação. A parte superior do gráfico (linha tracejada) não pode ser alcançada executando um experimento com crescimento contínuo de Fr .

Figura 15 - Esboço da solução teórica da altura adimensional da cavidade com o crescimento do número de Froude. F_F é o número de Froude acima do qual a cavidade da chaminé é formada.

Fonte: Schulz *et al.* (2020).

Na análise da Figura 15 também pode-se aferir que o gráfico mostra que essa formulação fornece h igual a zero para um Fr igual a zero, o que nem sempre é o caso. As cavidades são formadas para um número de Froude maior que zero, deste modo uma altura h igual a zero é também atingida com um Fr maior que zero. A formulação foi aplicada em um volume de controle acima da cavidade, não envolvendo os fenômenos que ocorrem próximos ao jato de entrada da água e que são responsáveis pela manutenção de $h=0$ para $Fr \neq 0$. Apesar dessa característica, o comportamento geral de crescimento e desestabilização da cavidade (formação de uma chaminé) é observado em experimentos de laboratório. Para números de Froude maiores que F_F , a cavidade sempre cresce até a superfície do leito, mesmo não havendo mais variações adicionais de Fr .

2.7.2 Orifício no fundo do tanque - escoamento em três direções

2.7.2.1 Equação da continuidade

A equação de conservação de massa (18) fornece, para condições homogêneas das Figura 12a e Figura 13, os resultados (apêndice E):

$$V_B = V_0 \left(\frac{D_o}{D} \right)^2 \frac{1}{(1 + 4\alpha)} \quad (29)$$

$$V_E = V_o \frac{D_o^{*2}}{h} \frac{\alpha^2}{(1+4\alpha)} \frac{1}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]} \quad (30a)$$

$$V_E = V_B \frac{h}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]} \quad (30b)$$

Assim como para a situação 2-D, da equação de continuidade, tem-se:

$$Q = V_B A_B + V_E A_E \quad (31)$$

Onde Q é a vazão que permeia o volume de controle na matriz porosa; A_B é a área da parte inferior do volume (área de entrada no volume) e A_E é a área de saída ou saída do volume. D é o diâmetro do volume de controle; D_o é o diâmetro do orifício e D_o^* é o diâmetro do orifício de forma adimensional, dado por $D_o^* = D_o/H$.

2.7.2.2 Equação da quantidade de movimento

A equação de conservação da quantidade de movimento (19) fornece, para as condições das Figura 12a e Figura 13, o seguinte resultado para a diferença das pressões excedentes médias normalizadas $\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H}\right)$ (apêndice F):

$$\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H}\right) = F_r^2 \left\{ \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha}\right)^2 \frac{D_o^{*5}}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]^2 h^2} - \frac{D_o^{*5}}{h^4} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha}\right)^2 - \alpha^2 \theta \frac{D_o^{*3}}{h^2} \right\} + \rho^* (1-h) + \alpha \frac{\tau^*}{h} (1-h) \quad (32)$$

Para a situação 3-D o número de Froude é definido como:

$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{(g D_o)}} \quad (33)$$

2.7.2.3 Equação de energia

A equação de conservação de energia (20) fornece, para as condições das Figura 12a e Figura 13, um resultado adicional para a diferença das pressões excedentes médias normalizadas $\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H}\right)$ (apêndice G):

$$\begin{aligned} \frac{p_B - p_E}{\rho g H} = & \frac{F_r^2}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 \left\{ (K_1 - 1) \frac{D_o^{*5}}{h^4} + \frac{1}{h^2} \frac{D_o^{*5}}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]^2} \right\} + \frac{K_2}{2} F_r \frac{D_o^{*5/2}}{h^2} \frac{\alpha^2}{(1+4\alpha)} - \\ & - [h + H_w^* + \rho^*(1-h)] + \frac{h}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]} \left\{ (1 + H_w^*) + \frac{4\alpha}{h} \left[\frac{1-h^2}{2} (1-\rho^*) + (1-h)(H_w^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (34)$$

2.7.2.4 Previsão da evolução da cavidade

As Equações (32) e (34) fornecem a equação que expressa a dependência entre a altura normalizada da cavidade, h , e o número de Froude do orifício Fr . Assim, obtém-se (apêndice H):

$$AF_r^2 + BF_r + C = 0 \quad (35a)$$

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 \frac{D_o^{*5} h^2}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 (1 + K_1) D_o^{*5} - \alpha^2 \theta D_o^{*3} h^2 \quad (35b)$$

$$B = -\frac{K_2}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right) D_o^{*5/2} h^2 \quad (35c)$$

$$C = h^3(1-h)\alpha\tau^* + h^4(1-h) \left\{ \frac{\rho^*[3\alpha + h(1-3\alpha)] - [2\alpha + h(1-2\alpha)]}{4\alpha + h(1-4\alpha)} \right\} \quad (35d)$$

$$F_r = -\frac{B}{2A} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4A^2} - \frac{C}{A}} \quad (35e)$$

Para o caso 3-D, a solução obtida é um polinômio de 8ª ordem de h e, para o qual, também não é conhecida nenhuma solução geral. Assim como no caso 2-D, a solução também é uma função quadrática de Fr , o que permite observar graficamente a dependência entre as duas variáveis de forma bijetiva.

As variáveis envolvidas no caso 2-D também estão presentes no caso 3-D. A diferença é que a largura adimensional da fenda H_w^* é substituída pelo diâmetro normalizado do orifício D_o^* , e que o número de Froude é definido usando D_o^* ao invés de W . As características da formulação mostrada na Figura 15 para o caso 2-D também são válidas para o caso 3-D. Ou seja, a cavidade é estável até que o número de Froude Total de Fluidização, F_F , seja atingido.

Esta formulação teórica permite afirmar que as cavidades evoluem da seguinte maneira:

- a) Em aumentando o número de Froude da entrada, aumenta-se a altura da cavidade.
- b) A cavidade é estável para números de Froude menores do que F_F .
- c) Toda cavidade se torna instável ao atingir F_F (a formulação é fundamentada em princípios físicos).
- d) Ao atingir F_F a cavidade expande até a superfície da matriz porosa, formando o que é denominado de chaminé e dando início ao processo erosivo devido ao jato de água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos desenvolveu-se um método de investigação que permitisse o estudo do comportamento do solo ao redor de vazamentos em sistemas de distribuição de água. Neste capítulo apresenta-se uma descrição detalhada do conjunto experimental utilizado, as modificações feitas em relação ao aparato original, as propriedades do material granular e, por fim, a metodologia para a obtenção dos dados através da utilização do equipamento em laboratório.

3.1 Conjunto experimental

O conjunto experimental utilizado foi desenvolvido por Bailey (2015) na Universidade de Cape Town, África do Sul, e cedido para a presente pesquisa com a finalidade de gerar um banco de dados experimentais mais amplo para o estudo específico da interação vazamento/solo. O equipamento experimental é mostrado na Figura 16 - Aparato experimental

A montagem experimental consiste em um tanque de vidro sustentado por uma base metálica, com um orifício de entrada central em sua base e um orifício de entrada adjacente à parede lateral que fornecem jatos ascendentes de água que simulam vazamentos. Cada orifício é utilizado separadamente de maneira que orifício lateral permite a visualização da região de fluidização e o orifício central permite melhores medições com os tubos de Pitot.

Acima do tanque está localizado o sistema de posicionamento dos tubos de Pitot que são utilizados nas medições de pressão e velocidade. Mangueiras transparentes foram conectadas às extremidades dos tubos e conectadas a tubos de visualização das variações de níveis de água. Existem quatro orifícios de transbordamento/extravasamento nas paredes do tanque conectados diretamente a um tanque metálico para armazenamento de água. O tanque de vidro para os experimentos foi preenchido com microesferas de vidro (Ballotini) de diâmetro reduzido (0.6 a 0.8 mm) que possuem a função de simular o solo de maneira ideal. A água foi direcionada diretamente da rede de distribuição até a entrada no tanque, utilizando-se de válvulas para o controle da vazão que, por sua vez, é aferida por um medidor de pressão.

Figura 16 - Aparato experimental (vista lateral).

Fonte: Adaptado de Bailey (2015).

Figura 17 – Esquema geral do aparato experimental.

Fonte: O autor (2020).

3.1.1 Tanque de vidro

O tanque de vidro, com dimensões de 566x566x488 mm, tem a função principal de ser o recipiente para as microesferas de vidro utilizadas para simulação do solo, além de servir como suporte para o sistema de posicionamento dos tubos de Pitot. Bailey (2015) ressalta que as dimensões do tanque foram escolhidas de modo que as paredes tenham a mínima ou nenhuma influência no escoamento através material granular. Em sua base estão localizados três orifícios, sendo dois deles utilizados para a entrada de água e um utilizado para a drenagem e limpeza do tanque. O orifício central possui diâmetro interno de 3 mm, enquanto que o orifício lateral possui diâmetro de 2.8 mm, estando o seu centro localizado a uma distância de 3 mm da parede lateral. A Figura 18 apresenta os principais componentes do tanque de vidro.

Figura 18 - Principais componentes do tanque de vidro.

Fonte: O autor (2020).

3.1.2 Sistema de fornecimento de água

O esquema geral do sistema de fornecimento é mostrado na Figura 19. O fornecimento de água foi obtido diretamente da rede de abastecimento público e o ponto inicial do sistema experimental foi o ponto hidráulico do laboratório. Em outros termos, o fornecimento de água se deu através da rede municipal de distribuição e sem a utilização de bombeamento para controle da pressão. As variações de pressão da rede foram neutralizadas através da utilização de uma válvula reguladora de pressão com manômetro instalada na linha principal do sistema e logo após o rotâmetro. A conexão com o ponto hidráulico do laboratório e a válvula reguladora de pressão são mostradas nas Figura 20a e 20b respectivamente.

Para a medição de vazão utilizou-se um rotâmetro com faixa de medição de 2 a 20 L/min, considerado adequado uma vez que a vazão mínima de operação foi igual a 2 L/min. Foi realizada a calibração do aparelho de maneira volumétrica com o auxílio de uma proveta e um cronômetro, sendo esse procedimento descrito na seção 4.1.

Um dos principais problemas descritos por Bailey (2015) foi a entrada de ar no sistema de fornecimento, o que prejudicava a operação de simulação do jato ascendente no meio granular e inviabilizava a tomada de pressão por meio dos tubos de Pitot. Para contornar esse obstáculo foi anexado ao rotâmetro um tanque desaerador, de modo que a possível entrada de ar no sistema proveniente da rede de abastecimento fosse eliminada. O conjunto contendo o rotâmetro e o desaerador pode ser visto na Figura 20c.

Figura 19 – Sistema de fornecimento de água.

Fonte: O autor (2020).

Foram utilizadas mangueiras de plástico de 20 mm para a primeira parte do sistema, conectada ao ponto hidráulico do laboratório. Para a segunda metade do sistema utilizou-se mangueiras plásticas de 6 mm, uma vez que, como já mencionado, os diâmetros externos dos orifícios de entrada eram reduzidos. A transição entre a primeira parte e a segunda parte foi feita através da redução interna mostrada na Figura 20d.

Figura 20 – (a) conexão com o ponto hidráulico do laboratório. (b) válvula reguladora de pressão. (c) rotâmetro e desaerador. (d) redução interna.

Fonte: O autor (2020).

Foram utilizadas 4 válvulas de esfera, sendo a válvula número 1 conectada ao ponto hidráulico do laboratório e utilizada para o controle e ajuste da vazão de entrada. As outras três válvulas foram utilizadas no decorrer dos experimentos de modo a permitir maior flexibilidade de operação ao longo da execução. Com o sistema em funcionamento as válvulas de número 2 e 4 ficavam abertas, ao passo que a válvula de número 3 permanecia fechada, fazendo com que o sistema permanecesse “isolado”, com escoamento ininterrupto desde o fornecimento até o orifício de entrada.

Um grande empecilho descrito por Bailey (2015) foi a obstrução dos orifícios de entrada pelas partículas Ballotini. Isso ocorreu predominantemente após a execução dos experimentos, quando o escoamento vindo da linha de abastecimento era interrompido e as partículas, de diâmetro menor que o orifício, se acumulavam na sua saída e causavam a obstrução. A desobstrução era feita através da inserção de um fio de arame fino através do orifício, o que induzia que as partículas caíssem nas mangueiras da linha de abastecimento. Após isso era feita a limpeza das mangueiras.

A obstrução do orifício pelas partículas é algo inevitável, uma vez que seu diâmetro é cerca de cinco vezes menor que a abertura. Porém uma modificação adotada por Govender (2016) melhora consideravelmente o processo de limpeza da linha bloqueada. Essa modificação foi a incorporação de um “braço lateral” através da adição de uma junção em T na linha principal. Esse braço lateral, por sua vez, foi conectado a uma válvula terminal (válvula número 3). Para o processo de limpeza da tubulação, a válvula número 2 era fechada e as válvulas de número 3 e 4 eram abertas, de forma que as partículas saíssem pelo braço lateral. Realizava-se, assim, a limpeza e desobstrução da linha de fornecimento.

3.1.3 Tubos de Pitot

As medidas de pressão excedente, velocidade e energia no leito fluidizado foram obtidas através da utilização de tubos de Pitot especiais. Os tubos foram fabricados em dois formatos diferentes, de modo que as medidas pudessem ser tomadas tanto verticalmente quanto horizontalmente. Para tomada de medidas verticais utilizou-se o tubo tipo reto, ao passo que para medidas horizontais utilizou-se o tubo tipo “L”. Esses tubos, mostrados na Figura 21, foram desenvolvidos por Bailey (2015) na Universidade de Cape Town e produzidos em aço inoxidável com diâmetro externo de 6,35 mm e diâmetro interno de 4,57 mm. Govender (2016) fez uma modificação com a qual as agulhas utilizadas passaram a ser do tipo hipodérmicas com abertura de 0.8 milímetros.

Figura 21 – Tubos de Pitot tipo L e reto.

Fonte: Adaptado de Bailey (2015).

3.1.4 Sistema de posicionamento dos tubos de Pitot

As medidas tomadas através dos tubos de Pitot foram em três direções distintas (duas horizontais e uma vertical). O sistema de posicionamento tem a função principal de fixar e permitir o posicionamento tridimensional dos tubos no interior do tanque. A Figura 22 apresenta o aparato completo do sistema de posicionamento dos tubos de Pitot juntamente com a indicação dos eixos com grau de liberdade de movimentação para o tubo de Pitot.

Usando réguas de aço, o sistema de posicionamento do tubo de Pitot era calibrado para permitir o posicionamento do mesmo em pontos pré-definidos no tanque. Ao se colocar a haste dos tubos de Pitot na unidade de fixação a plataforma permite os deslocamentos nos eixos X e Y, ao passo que no eixo Z a movimentação era feita através do deslocamento da própria haste (a própria plataforma não se desloca em Z, mas fixa a haste que faz este deslocamento).

A Figura 23 mostra os detalhes da unidade de fixação para os tubos de Pitot. A plataforma permite a utilização de apenas um tubo de Pitot por vez, de modo que se deve alternar entre a utilização do tubo reto e do tubo tipo L.

Figura 22 – Sistema de posicionamento dos tubos de Pitot com indicação dos eixos de movimentação.

Fonte: O autor (2020).

Figura 23 – Unidade de fixação dos tubos de Pitot.

Fonte: Adaptado de Bailey (2015).

3.1.5 Tubo de visualização

O tubo de visualização de vidro funciona, nos experimentos, como uma espécie de piezômetro, de maneira que permite a realização de medições da carga de pressão. Isso é possível pelo fato de a extremidade inferior do tubo de vidro ser conectada a uma mangueira flexível transparente, estando a outra extremidade da mangueira conectada ao tubo de Pitot utilizado no momento. Deste modo cria-se um sistema hermético contínuo, com aberturas apenas na ponta do tubo de Pitot imersa no tanque e na extremidade superior do tubo de visualização. Isso significa que as variações de pressão experimentadas na ponta do tubo de Pitot (agulha hipodérmica) são transmitidas para o tubo de visualização. A variação da elevação da água (carga de pressão) no tubo de visualização pode então ser registrada. A Figura 24 mostra o sistema contínuo utilizado para a medição das variações na carga de pressão após a fluidização.

Figura 24 - Sistema utilizado para a medição das variações na carga de pressão após a fluidização.

Fonte: O autor (2020).

3.1.6 Propriedades do solo - Ballotini

Para a simulação do solo circundante a uma tubulação foi utilizado um material granular especial, que consiste em microesferas de vidro denominadas Ballotini. Essas microesferas permitiram a simulação com um “solo” ideal, uma vez que são aproximadamente uniformes em tamanho e forma. Essa uniformidade permite que se tenha um maior controle das variáveis que determinam o fenômeno de crescimento das cavidades, impedindo a interferência da elevada variação de formas, tamanhos e rugosidades existentes em um solo real nesta primeira abordagem. Isso permite analisar as outras variáveis em experimentos adicionais, para os quais este primeiro atua como referência ou controle. A Figura 25 apresenta uma imagem microscópica das microesferas de vidro e mostra a diferença de uniformidade de tamanho e forma em relação a uma amostra de areia.

Figura 25 – Visão microscópica típica das microesferas de vidro utilizadas nos experimentos e sua comparação com uma amostra de areia.

Fonte: Kandasami e Murthy (2014).

As microesferas utilizadas possuem uma variação do diâmetro entre 0.6 e 0.8 mm, e sua distribuição granulométrica é apresentada na Figura 26. A Tabela 2 mostra as propriedades do material granular utilizado determinadas por Lawrence (2008) através de experimentos.

Tabela 2 - Características das esferas de vidro Ballotini utilizadas

Parâmetro	Valor
Densidade da partícula	2386 kg/m ³
Densidade aparente	1503 kg/m ³
Diâmetro médio	0.70 mm
Porosidade	0.39
Esfericidade	0.988 (totalmente esférico = 1)
Condutividade hidráulica	0.199 cm/s

Fonte: Adaptado de Lawrence (2008).

Figura 26 – Distribuição granulométrica típica de microesferas de vidro Ballotini e areia.

Fonte: Adaptado de Kandasami e Murthy (2014).

3.2 Metodologia experimental

A concepção geral do procedimento metodológico utilizado na execução dos experimentos foi baseada na metodologia desenvolvida por Bailey (2015) e Govender (2016). Porém, mudanças e adaptações foram realizadas para o presente estudo, para as condições de trabalho adotadas. Nesta seção são apresentados os métodos utilizados para concluir um experimento padrão, assim como a descrição dos processos metodológicos desenvolvidos na utilização do PIV na investigação do fenômeno da fluidização.

3.2.1 Preparação para um experimento padrão

A metodologia experimental adotada visa evidentemente a obtenção dos objetivos propostos. Antes do início dos experimentos foram então estabelecidos parâmetros, métricas (no presente contexto entendido como um meio de mensuração de desempenho por meio de um conjunto de dados) e técnicas a serem utilizadas na execução experimental e na análise dos resultados. As seguintes etapas foram usadas na preparação do material granular e do aparato experimental.

3.2.1.1 Grid (Malha) de medições

Na concepção do grid (malha) de medição assumiu-se que a geometria da região fluidizada era simétrica em qualquer plano vertical que passasse pela origem (centro do orifício). Em outros termos, qualquer medição representada em um plano vertical que corte a região fluidizada e passe pela origem, quando dividido ao meio apresenta características idênticas em ambos os lados do eixo vertical central. As características assumidas simétricas incluem a forma e o tamanho da região fluidizada, a velocidade do fluido e das partículas e a pressão no ponto. Além disso, Bailey (2015), em seu estudo original, concluiu, através de medidas, que o fluido não escoava perpendicularmente ao plano vertical adotado. Assim, as medições das cargas de pressão excedente e das velocidades experimentadas na região fluidizada são realizadas em apenas uma metade do plano vertical que corta a região fluidizada. A Figura 27 ilustra o grid (malha) de medição adotado.

Figura 27 – Planos e grid (malha) de medição utilizados.

Fonte: O autor (2020).

3.2.1.2 Coordenadas de referência para medições

A determinação das coordenadas de referência para os tubos de Pitot configura-se como uma etapa primordial nos procedimentos preparatórios, uma vez que, após o preenchimento do tanque com as microesferas de vidro, torna-se impossível a visualização da localização da ponta dos tubos Pitot (ponto de medição). Assim, este procedimento inicial foi realizado com o tanque completamente vazio.

O orifício central foi adotado como ponto de referência para as coordenadas, sendo suas coordenadas o ponto (0,0,0). A ponta de cada tipo de tubo de Pitot foi colocada exatamente acima do centro do orifício e as leituras nos eixos X, Y e Z para os respectivos tubos de Pitot foram então registradas nas réguas para estabelecer as coordenadas de referência. O mesmo procedimento foi realizado tanto no orifício central quanto lateral, uma vez que medidas foram tomadas em ambos os casos.

Ressalta-se que no orifício lateral ocorrem limitações espaciais no sistema de posicionamento dos tubos e a ponta do tubo de Pitot reto foi posicionada a uma distância de 7 mm do centro do orifício ao longo do eixo Y. A Figura 28 ilustra os pontos de referência na determinação das coordenadas de medição para o orifício lateral.

Figura 28 – Determinação das coordenadas de referência: orifício lateral.

Fonte: O autor (2020).

Além disso, destaca-se que na utilização de tubos de Pito tipo L, em ambos os orifícios as medições foram realizadas a uma distância de 2 milímetros acima do orifício devido a imposições causadas por sua geometria (do tubo de Pitot).

3.2.1.3 Preparo da camada granular

Bailey (2015) e Govender (2016) destacam a frequente ocorrência da entrada e acúmulo de bolhas de ar no meio da camada granular. Esse eventual acúmulo de bolhas mostrou-se deveras danoso para a obtenção de resultados, posto que bolhas de ar interferem diretamente nas medições de pressão excedente e na velocidade do fluido no ponto durante o fenômeno da fluidização. Portanto, o correto controle e preparo da camada granular de modo que se evite o acúmulo de ar é imprescindível no decorrer do procedimento experimental. Os seguintes passos foram adotados no preparo do meio granular.

- a) Com o orifício de drenagem selado, o tanque foi preenchido de água até o nível de extravasamento;
- b) Com um pequeno recipiente as microesferas de vidro foram colocadas no tanque de maneira gradual. O recipiente era inserido no tanque com água e a pequena quantidade de microesferas era “solta” de maneira que se espalhasse uniformemente ao longo da área de base do tanque.;
- c) O material granular foi disposto de maneira uniforme em camadas até que se atingisse a altura final do meio granular desejado. Três alturas de camadas granulares foram testadas: 150 mm, 200 mm e 300 mm;
- d) Por fim, a superfície final da camada foi levemente regularizada com o auxílio de uma régua.

O procedimento descrito acima foi realizado a cada novo experimento e sempre que julgava-se necessário devido ao acúmulo de ar na camada.

3.2.1.4 Preparo dos tubos de Pitot

A utilização dos tubos de Pitot se deu da seguinte maneira:

- a) Com o tipo de tubo de Pitot a ser utilizado já fixo na plataforma de posicionamento e com sua extremidade inferior submersa na água (acima da camada de solo) foi conectado em sua extremidade superior a mangueira flexível;

- b) A extremidade livre da mangueira era abaixada a um nível inferior ao da base do tanque de maneira que a água “jorrasse” pela abertura livre (por vezes era necessário aplicar sucção na extremidade livre para que eventuais bolhas de ar acumuladas na mangueira fossem retiradas);
- c) A extremidade livre da mangueira era conectada ao tubo de visualização de vidro e o mesmo preso ao suporte lateral provido de uma escala métrica;
- d) Esperava-se um curto período de tempo para que o nível de água no tubo de visão se estabilizasse. Possíveis bolhas de ar que permaneceram ou se formaram na mangueira eram “deslocadas” manualmente até a superfície livre no tubo de visualização;
- e) Por fim, a leitura do nível da água no tubo de visualização era registrada após garantir que a água no tanque estivesse no nível de extravasamento. Através da Lei de Stevin, ou ainda, pelo princípio dos vasos comunicantes, sabe-se que o nível da água do tubo de visualização (que se encontra paralelo ao tanque) será o mesmo da superfície de água no tanque. Essa leitura configura-se como uma medida da carga de energia no tanque em condições estáticas (isto é, antes da fluidização) e, independentemente do tipo de tubo de Pitot ou de sua posição no tanque, essa leitura permanece sempre constante. Assim, essa leitura era tomada como nível de referência de energia e a sua variação, após o início da fluidização, permite o cálculo das pressões excedentes geradas.

3.2.2 Procedimento experimental

Considerou-se o início do experimento a partir do momento em que a vazão inicial a ser utilizada para induzir a fluidização ficava estabelecida. Uma vez estando a vazão estabilizada, dava-se início ao experimento abrindo a válvula de esfera n. 4 e fechando-se, simultaneamente, a válvula de esfera n.3 (Figura 19). Após isso os tubos de Pitot foram utilizados para obter as leituras de pressões excedentes e de velocidade em diversos pontos da camada granular conforme o grid (a malha) já estabelecido. Os métodos usados na execução destas etapas são descritos abaixo.

3.2.2.1 Estabelecimento da vazão

- a) Primeiramente apenas a válvula n.4 permanecia fechada enquanto que todas as outras válvulas de controle ficavam abertas. Isso permitia que o escoamento vindo da rede de abastecimento do laboratório fosse direcionado apenas para o “braço lateral”. Esse primeiro passo permitia que microesferas de vidro que estivessem na linha principal de fornecimento fossem expelidas através do braço lateral, desobstruindo, assim, a linha de fornecimento;
- b) Utilizando a válvula de ajuste fino e a graduação do rotâmetro acoplado à linha principal estabelecia-se a vazão de início a ser utilizada no momento. No experimento padrão a vazão inicial era de 2 L/min.
- c) Abria-se a válvula n.4 e, concomitantemente, fechava-se a válvula n.3, de maneira que o escoamento fluísse através da camada granular e induzisse o fenômeno da fluidização. Por vezes o orifício de entrada estava bloqueado por partículas, o que impedia que o escoamento fluísse para a camada granular. Assim, executava-se a desobstrução com a utilização de um arame fino e retornava-se para o passo a).
- d) As demais vazões seguintes à vazão inicial eram estabelecidas sem a interrupção do experimento. Ou seja, de maneira sequencial e ininterrupta e separadas pelo intervalo de tempo necessário para a realização das medições referentes a cada vazão.

3.2.2.2 Procedimento de medição

O processo de medição consistiu na realização de leituras do nível de água no tubo de visualização para pontos predeterminados no plano de medição, ou seja, nos pontos do grid (malha) definido (Figura 27). Foi adotado um espaçamento de 10 milímetros na horizontal (ao longo do eixo Y) até uma distância máxima de 30 milímetros. Ao passo que o grid (malha, escala) vertical (ao longo do eixo Z) foi subdividido em 3 regiões, sendo a primeira de 0 a 50 milímetros com espaçamento de 5 milímetros entre os pontos. A segunda região de 50 a 100 milímetros com espaçamento de 10 milímetros e, por fim, a terceira região de 100 a 200 milímetros com espaçamento de 20 milímetros. O grid (malha) adotado foi elaborado de acordo com os resultados e a geometria da região fluidizada observados em trabalhos semelhantes anteriores.

Cada leitura realizada durante o experimento foi registrada no milímetro mais próximo abaixo do menisco, que se formava após o nível da água no tubo de visão se estabilizar.

3.2.2.3 Medidas e cálculo de pressão e velocidade

A primeira medição realizada, como destacado anteriormente, foi a carga de referência utilizando-se o tubo de Pitot tipo L posicionado acima da camada granular e antes da fluidização, ou seja, a carga em condições estáticas em estado de pré fluidização. Todas as demais medições foram realizadas no plano determinado pelos eixos Y negativo e Z positivo, ou seja, o plano YZ. A Figura 29 apresenta o método adotado para as medições em cada ponto.

Figura 29 – Representação da metodologia de medição.

Fonte: O autor (2020).

Como destacado anteriormente, Bailey (2015) observou que o fluido não se desloca no sentido perpendicular ao plano vertical que passa pela origem. Ou seja, na direção ortogonal ao plano de medição (YZ) não há escoamento e, conseqüentemente, não há carga de velocidade. Assim, utilizando-se o tubo de Pitot tipo L paralelo ao plano XZ (de maneira que sua ponta fique ortogonal ao plano de medição) obtém-se a leitura referente à carga piezométrica no ponto.

$$CP = \frac{p}{\gamma} + Z \quad (36)$$

Onde CP é a carga piezométrica no ponto; p/γ é a carga de pressão no ponto e Z é a carga de elevação (ou carga estática).

É importante destacar que ao longo do plano YZ o escoamento é bidimensional, ou seja, a velocidade em determinado ponto possui componentes na vertical (eixo Z) e na horizontal (eixo Y). Já a pressão, para fluidos incompressíveis como a água, se mantém constante em todas as direções. Isto posto, ao se utilizar o tubo de Pitot tipo L paralelo ao plano YZ as leituras indicam a carga total horizontal (H_h), isto é, a soma da carga de pressão, da carga de elevação e da carga cinética gerada pela componente horizontal da velocidade.

$$H_h = \frac{p}{\gamma} + \frac{V_h^2}{2g} + Z \quad (37)$$

De modo análogo, ao se utilizar o tubo de Pitot reto verticalmente (de maneira que sua ponta fique perpendicular ao plano XY) as leituras indicam a carga total vertical (H_v).

$$H_v = \frac{p}{\gamma} + \frac{V_v^2}{2g} + Z \quad (38)$$

Em resumo as medições realizadas são:

- Carga em condições estáticas (em estado pré fluidização e medida direta do nível de água no tanque) utilizando o tubo de Pitot tipo L acima da camada granular;
- Carga piezométrica, CP , utilizando o tubo de Pitot tipo L paralelo ao eixo XZ;
- Carga total horizontal, H_h , utilizando o tubo de Pitot tipo L paralelo ao plano YZ;
- Carga total vertical, H_v , utilizando o tubo de Pitot tipo reto ortogonal ao plano XZ.

Após as medições realizadas em laboratório procedeu-se o cálculo, em planilha eletrônica, dos fatores de interesse utilizados nas análises subsequentes. Primeiramente usando a Equação (36) foi determinada a carga de pressão excedente em milímetros.

$$\frac{p}{\gamma} = CP - Z \quad (39)$$

Através da carga de pressão a pressão absoluta, em Pascal, pode ser obtida multiplicando-se a carga pelo peso específico da água. Por meio da Equação (37) faz-se possível o cálculo da carga cinética na horizontal e, por conseguinte, determina-se a velocidade horizontal no ponto.

$$\frac{V_h^2}{2g} = H_h - \left(\frac{p}{\gamma} + Z \right) \quad (40a)$$

$$\therefore V_h = \sqrt{2g \left[H_h - \left(\frac{p}{\gamma} + Z \right) \right]} \quad (40b)$$

Da mesma forma procede-se para o cálculo da carga cinética e das velocidades verticais.

$$\frac{V_v^2}{2g} = H_v - \left(\frac{p}{\gamma} + Z \right) \quad (41a)$$

$$\therefore V_v = \sqrt{2g \left[H_v - \left(\frac{p}{\gamma} + Z \right) \right]} \quad (41b)$$

Com as componentes horizontal e vertical da velocidade pode-se calcular a velocidade resultante no ponto.

$$V = \sqrt{V_h^2 + V_v^2} \quad (42)$$

A energia excedente, ou seja, aquela gerada após o fenômeno da fluidização, é dada pela soma das cargas de pressão excedente e carga cinética no ponto (carga cinética total do ponto dada pela resultante da velocidade).

$$E = \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (43)$$

O Quadro 2 apresenta um exemplo de cálculo seguindo os passos descritos acima.

Quadro 2 – Exemplo de cálculo para um do grid (malha) de medição.

Leituras [mm]			
Pitot Reto	Pitot tipo L		
Energia total vertical (Hv)	Energia total horizontal (Hh)	Carga piezométrica	Carga estática
106	114	143	123
Cálculos			
Carga de pressão excedente [mm]		20	
Carga cinética na horizontal [mm]		-29	
Carga cinética na vertical [mm]		-37	
Velocidade horizontal [m/s]		-0,754	
Velocidade vertical [m/s]		-0,852	
Resultante de velocidade [m/s]		1,138	
Carga cinética [mm]		66	
Pressão excedente [Pa]		196,2	
Energia excedente [mm]		86	

Fonte: O autor (2020).

3.2.2.4 Medidas das alturas de fluidização

Para o orifício lateral a determinação das alturas de fluidização é igualmente possível, uma vez que o orifício se encontra adjacente à parede lateral do tanque. Assim, pode-se realizar a visualização e captura de imagem da geometria da região fluidizada. Tendo isso em vista foi utilizada uma câmera fotográfica digital de alta capacidade para a captura das imagens durante os experimentos, sendo a câmera empregada uma CCD Kodak Megaplug modelo ES 1.0. A sigla CCD refere-se ao termo Charge Couple Device, o que significa que as imagens capturadas são transformadas em sinais elétricos e podem ser transferidas a um computador via comunicação serial. A frequência de captação de imagens utilizada durante os experimentos foi de 15 frames por segundos (fps).

3.3 Metodologia para a técnica PIV

A técnica de velocimetria por imagem de partículas foi utilizada para determinação dos campos de velocidade da região móvel utilizando-se o orifício lateral, procurando obter resultados com o mínimo de interferência no escoamento original. O sistema PIV utilizado para a captura das imagens é descrito abaixo e pode ser visto nas Figura 30 e Figura 31.

- Sistema computacional para armazenamento das sequências de imagens da zona móvel e para cálculo das velocidades através do software MatPIV 1.7 (Sveen, 2004);
- Tripé adequado com controle de nível e horizontalidade para o posicionamento da câmera de vídeo;
- Conjunto adequado de iluminação;
- Câmera de vídeo com velocidade de captura adequada para a região de medição proposta.

A iluminação adequada foi obtida por tentativas, adicionando lâmpadas fluorescentes de 100 Watts uma a uma à iluminação básica do laboratório e escolhendo a distância mais favorável entre as fontes de luz e a região fluidizada.

Figura 30 – Configuração do sistema PIV utilizado para determinação dos campos de velocidade.

Fonte: O autor (2020).

Figura 31 – Vista lateral do esquema geral da configuração para a técnica PIV.

Fonte: O autor (2020).

O movimento observado das partículas indicou que uma câmera de vídeo com velocidade de captura na faixa de 200 a 300 fps seria adequada. Deste modo, visando um custo-benefício otimizado para o processo, optou-se pela utilização da família de câmeras do Iphone que possui, no modo câmera lenta, uma velocidade de captura de 240 fps. Testes preliminares foram feitos para verificar a aplicabilidade desta alternativa e os resultados foram satisfatórios para os objetivos propostos. Os experimentos de visualização foram conduzidos para vazões de 2, 3, 4 e 5 l / min, através do orifício com diâmetro de 2,8 mm.

3.3.1 Análise das imagens e geração dos campos instantâneos

Obtidas e registradas as imagens da região de recirculação da zona fluidizada, elas foram analisadas utilizando a técnica PIV. O software utilizado foi o MatPIV em sua versão 1.7. O algoritmo geral de funcionamento é descrito na seção 2.6.4.

Através das funções contidas no pacote disponibilizado foi escrito e adaptado um script (rotina) para obter os campos de velocidade instantânea. A rotina estabelecida “lê” quantas imagens estão contidas no diretório apontado e aplica a metodologia PIV a cada par de imagens consecutivas. Ou seja, se o diretório contiver N imagens, serão gerados e salvos N-1 campos de velocidade instantânea. Posteriormente, com os N-1 campos obtidos, pode-se gerar um campo médio de velocidades. A rotina é executada em loop até que se verifique todas as imagens

contidas no diretório, sem limite do número de imagens. Matrizes com as coordenadas e com a magnitude de cada vetor são geradas e podem ser exportadas para planilhas eletrônicas fora do ambiente MATLAB. Além disso, os resultados são apresentados em imagens contendo o campo vetorial resultante do processo. O script (rotina) produzido, contendo os parâmetros de análise, é mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Código em MATLAB utilizado na geração de campos de velocidades instantâneas entre duas imagens consecutivas.

```

1 %Gerar campos instantaneos de velocidade entre duas imagens consecutivas
2 T=(1/240); % Time separation between base and cross images.
3 met='multin'; % Use interrogation window offset
4 wins=[32 32;32 32;16 16;16 16;8 8;8 8]; %windowsizes to use in the iterations
5 woco='worldco78.mat'; % World coordinate file. This may be changed
6 snrtrld=1.3; % threshold for use with snr-filtering
7 globtrld=3; % threshold for use with globalfiltering
8 loctrld=2; % threshold for use with local filtering
9 med='median'; % Use median filtering in localfilt
10 int='linear'; % interpolate outliers using linear interpolation
11 maskfile='polymask44.mat'; % name of file containing the pre-defined mask
12 M=length(dir('C:\Users\igorm\Documents\MATLAB/*.bmp')); % check how many images are
present in the directory
13 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
14 for i=1:M-1
15 im1=['vcr100',num2str(i),'.bmp'];
16 im2=['vcr100',num2str(i+1),'.bmp'];
17 % PIV calculation
18 [x,y,u,v,snr,pkh]=matpiv(im1,im2,wins,T,0.5,met,woco,maskfile);
19 % SnR filter:
20 [su,sv]=snrfilt(x,y,u,v,snr,snrtrld);
21 %Peak height filter
22 [pu,pv]=peakfilt(x,y,su,sv,pkh,0.5);
23 % global filter:
24 [gu,gv]=globfilt(x,y,pu,pv,globtrld);
25 % local median filter:
26 [mu,mv]=localfilt(x,y,gu,gv,loctrld,med);
27 % interpolate outliers
28 [fu,fv]=naninterp(mu,mv,int,maskfile,x,y);
29 w=magnitude(x,y,fu,fv);
30 save(['vel_field',num2str(i),'.mat'],'fu','fv','u','v','snr','w');
31 fig=quiver(x(1:4:end),y(1:4:end),fu(1:4:end),fv(1:4:end),2); axis tight
32 saveas(fig,['campo',num2str(i),'.bmp']);
33 if i==1
34 save coordinates.mat x y
35 end
36 end

```

Fonte: O autor (2020).

Mais detalhes sobre a utilização completa do software e descrição detalhada das funções disponibilizadas podem ser verificados em seu manual de operação, disponível de maneira gratuita juntamente com o software por Sveen (2004).

Salienta-se que as imagens obtidas e utilizadas foram tratadas em software livre de edição anteriormente a sua utilização. Os ajustes necessários foram feitos nos procedimentos da presente pesquisa. Foram aplicados filtros, como por exemplo, ajustes na saturação, no contraste e no brilho. Os ajustes foram aplicados por tentativa e erro, de modo que após a modificação das imagens, elas eram testadas e verificava-se a qualidade e a razoabilidade dos resultados.

Uma vez gerados os campos instantâneos de velocidade, procedeu-se a obtenção de campos médios que representassem o escoamento. Para isto, foi escrito um pequeno código em MATLAB que importa os campos gerados na etapa anterior e realiza os cálculos da média em operação aplicada a cada um dos termos das matrizes de campos instantâneos. Os resultados finais também são matrizes e imagens do campo vetorial gerado.

Por fim, na análise dos erros associados a medição foi realizado o cálculo do desvio padrão referente à amostra utilizada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através da aplicação da metodologia detalhada no capítulo anterior são apresentados nesta seção. Os mesmos são acompanhados pela descrição e discussão quantitativa e qualitativa e a análise dos diversos fatores atuantes no fenômeno da fluidização. Primeiramente apresenta-se os resultados obtidos na calibração do rotâmetro, seguido de uma discussão a respeito das alturas de fluidização encontradas na utilização do orifício lateral. Posteriormente são expostos os resultados decorrentes da aplicação da técnica PIV. Por fim, são apontados os resultados das medições realizadas no orifício lateral e central.

4.1 Calibração do rotâmetro

Nos mais diversos tipos de rotâmetros a escala pode ser lida diretamente. No entanto diversos fatores afetam a exatidão das medições, como por exemplo as diferentes condições de uso, o tempo de uso do equipamento e erros de leitura como de paralaxe, etc. Assim, faz-se necessário realizar correções nas leituras obtidas, de modo que o valor apresentado seja condizente com o valor real de vazão. Essas correções podem ser feitas através de curvas de calibração.

Para isso foi utilizado uma proveta com volume de um litro e um cronômetro de precisão. O procedimento experimental é bastante simples, de modo que se utiliza o cronômetro para registrar o tempo no qual o volume de um litro da proveta é completado. Desta maneira pode-se determinar a vazão correspondente através da razão entre o volume preenchido e o tempo registrado. A cada teste a leitura era realizada no rotâmetro, de modo a obter e comparar a vazão real e a vazão lida diretamente no aparelho.

4.1.1 Resultados Experimentais

Os gráficos das Figura 33 a 36 apresentam os dados obtidos nos testes realizados em laboratório para a obtenção da curva de calibração do rotâmetro de forma gráfica e ilustrativa. Os erros percentuais associados a cada leitura também são apresentados.

Figura 33 - Dados experimentais referentes a vazão de 2 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 34 - Dados experimentais referentes a vazão de 4 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 35 - Dados experimentais referentes a vazão de 6 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 36 - Dados experimentais referentes a vazão de 8 L/min.

Fonte: O autor (2020).

A Figura 37 apresenta o resumo dos dados obtidos. Observa-se que o erro percentual decresce ao longo da escala operativa do rotâmetro. Isso significa que, para valores mais distantes do limite inferior do equipamento, obtém-se uma melhor exatidão entre os resultados apresentados e os resultados reais.

Figura 37 - Resumo dos dados para obtenção da curva de calibração.

Fonte: O autor (2020).

Para a construção da curva de calibração utilizou-se o método dos mínimos quadrados, que fornece resultados não tendenciosos e com variância mínima, dentro de certas suposições de natureza estatística. Esse método faz uso da regressão linear simples que fornece uma relação linear entre as variáveis do problema. A Figura 38 mostra o resultado obtido através da aplicação deste método para a calibração do rotâmetro.

Figura 38 - Curva de calibração obtida para o rotâmetro.

Fonte: O autor (2020).

O coeficiente de correlação múltipla, R^2 , mede o grau de correlação entre as duas variáveis lineares. Esse coeficiente varia entre zero e um, sendo que quanto mais próximo do valor máximo, mais o modelo consegue descrever a variação em y . O valor obtido de R^2 de 0.9902 significa que 99.02% da variação total em torno da média foi explicada pelo modelo e é considerado um resultado satisfatório, ou seja, pode-se dizer, de maneira cautelosa, que o ajuste é aceitável.

A Tabela 3 apresenta uma síntese do tratamento estatístico básico aplicado ao espaço amostral disponível.

Tabela 3 - Exatidão do rotâmetro utilizado.

Amostras dos dados de vazão				
Leitura (L/min)	2	4	6	8
Média	2,117	4,152	5,871	8,130
Exatidão	0,117	0,152	0,129	0,130
Desvio Padrão	0,0103	0,0317	0,0367	0,0246
Erro Percentual	5,828	3,806	2,153	1,626
Erro Padrão	0,0046	0,0142	0,0164	0,011
Exatidão geral	3,353 %			

Fonte: O autor (2020).

A exatidão expressa a diferença entre a média observada das medições efetuadas e o valor verdadeiro da grandeza medida, ou seja, é a aptidão do instrumento para dar indicações próximas do verdadeiro valor da grandeza. Outro fator a se considerar é a linearidade, que é igual ao máximo valor de exatidão obtido ao longo de toda a escala de operação do instrumento.

O rotâmetro utilizado apresenta uma exatidão de cerca de 3%, o que corresponde a uma exatidão considerada boa para o nível de precisão desejado e equivalente os resultados apresentados por outros aparelhos disponíveis no mercado onde a gama de exatidão pode chegar até 5%.

4.2 Vazão mínima para a formação da cavidade

A determinação da vazão mínima para a qual ocorre o surgimento da cavidade foi obtida empiricamente, uma vez que não haviam informações anteriores acerca deste aspecto da formação da cavidade neste equipamento. O procedimento de determinação da vazão mínima iniciou aplicando-se uma vazão muito pequena que, visualmente, não causava a formação de uma cavidade. Esta vazão foi incrementada gradativamente até que se observasse a formação da cavidade, ou seja, até que ocorresse uma fluidização aparente mínima. Um aspecto da execução deste experimento foi o uso de vazões abaixo da faixa operável de vazões do rotâmetro que, como exposto anteriormente, era de 2 a 20 L/min. Assim, para as pequenas vazões iniciais foram utilizados cronômetro e proveta na determinação da vazão utilizada.

A válvula globo utilizada para controlar a vazão não era de ajuste fino. Isto implica que podem haver imprecisões na fixação da vazão. A vazão encontrada para o surgimento da primeira cavidade foi de 0.659 L/min e gerou uma região fluidizada com 5 mm de altura e 6 mm de largura.

4.3 Geometria da região fluidizada

Os resultados encontrados em trabalhos anteriores e na presente pesquisa indicam que a altura da região fluidizada aumenta com o aumento da vazão. Da definição de fluidização sabe-se que fenômeno ocorre quando a força exercida pelo jato ascendente de fluido iguala ou supera o peso do leito de partículas. A altura da camada granular permanece constante durante um mesmo experimento, ao passo que a vazão é aumentada paulatinamente. Deste modo a força de arrasto provocada pelo jato ascendente aumenta, enquanto que a força exercida, em sentido

contrário, pelo peso da camada permanece constante. Tal situação induz que se espere que a altura da zona móvel provocada pela fluidização aumente ao longo de um experimento. A Figura 39 comprova o exposto acima e apresenta a evolução da geometria da região fluidizada mediante ao aumento da vazão pelo orifício de entrada. Na figura, a altura da camada granular foi de 300 mm e a profundidade total (camada de solo mais lâmina de água até o nível de extravasamento) é de 449.5 mm.

Figura 39 - Geometria da região fluidizada. (a) Vazão de 2 L/min. (b) Vazão de 3 L/min. (c) Vazão de 4 L/min. (d) Vazão de 5 L/min.

Fonte: O autor (2020).

O gráfico mostrado na Figura 40 mostra o aumento da área no plano diametral da região fluidizada com o aumento da vazão. Assumindo-se que a relação entre a área da região fluidizada e a vazão de entrada pode ser entendida como linear, o coeficiente de correlação cruzada múltipla, R^2 , foi de aproximadamente 0.96, o que expressa uma boa relação entre as variáveis. Extrapolando as linhas de tendências determinadas, observa-se que a área de fluidização igual a zero é encontrada para uma vazão de aproximadamente 1.5 L/min. Porém a vazão mínima para a ocorrência da formação da cavidade, conforme exposto na seção 4.2, foi medida no presente conjunto de experimentos, obtendo-se o valor de 0.659 L/min. Isso

demonstra que, apesar do coeficiente de correlação ser próximo a 1, a tendência linear adotada não é adequada e deve ser utilizada com cuidado observando os limites de aplicação.

Figura 40 – Áreas da região fluidizada em contato com a parede do tanque.

Fonte: O autor (2020).

A Figura 41 mostra as alturas de fluidização conforme a vazão de entrada. Os dados mostrados como “testes” de 1 a 3 são dados obtidos na presente pesquisa. No gráfico também são mostrados os resultados obtidos por Govender (2016) e Bailey (2015). Todos os resultados mostram o aumento da altura de fluidização conforme o aumento da vazão de entrada.

Figura 41 - Alturas de fluidização.

Fonte: O autor (2020).

Nos três trabalhos as condições utilizadas na experimentação são as mesmas, com a camada granular com altura de 300 mm e utilizando-se o orifício lateral. Porém, observa-se que o comportamento dos pontos, no tocante à concavidade das tendências experimentais, é semelhante entre a presente pesquisa e o trabalho de Bailey (2015), enquanto que o comportamento verificado por Govender (2016) apresenta uma característica de concavidade contrária. Não é possível determinar com precisão a causa desta diferença, mas algumas hipóteses podem ser levantadas, como por exemplo, as diferentes condições de compactação do material granular em cada experimento; possíveis entupimentos parciais do orifício de entrada modificando a área e a velocidade do jato injetado, ou imprecisões das leituras decorrentes de interferências ainda não reconhecidas.

4.4 Resultados na utilização da técnica PIV

Como descrito na seção 2.7, a formulação teórica foi desenvolvida aplicando o caso permanente a um volume de controle localizado acima da região gerada na fluidização em um leito granular ainda não desestabilizado. O comportamento e as velocidades das partículas sólidas na superfície inferior desse volume de controle foram observados de maneira experimental no presente estudo e são apresentados e descritos nessa seção. A magnitude muito baixa das velocidades das partículas em relação ao jato de água ascendente permitiu verificar a condição suave do movimento das partículas e, conseqüentemente, a condição estável da superfície inferior. A não-erosão é adequada para a manutenção do regime permanente e a conseqüente utilização dos resultados da formulação teórica.

4.4.1 Campos instantâneos de velocidade na zona móvel

A técnica PIV foi utilizada para a obtenção dos campos de velocidade do material granular fora da região do jato ascendente, ou seja, na zona móvel. É importante salientar que na técnica PIV as velocidades determinadas são das partículas, enquanto que com utilização dos tubos de Pitot as velocidades registradas são do fluido, isto é, da água. A partir da Figura 42 até a Figura 46 mostram-se os campos médios de velocidades instantâneas obtidos para as vazões de 2, 3, 4, 5 e 6 L/min juntamente com um mapa de cores mostrando suas magnitudes.

Figura 42 – Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 2 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 43 - Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 3 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 44 - Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 4 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 45 – Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 5 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 46 - Campo instantâneo de velocidade para a vazão de 6 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Os campos de velocidade mostram que a movimentação da zona móvel é bem definida e segue o caminho preferencial da parte superior para a parte inferior da cavidade, expandindo-se lateralmente até aproximadamente a altura média do jato ascendente e contraindo-se até a base do jato. As figuras permitem afirmar que a região fluidizada segue uma forma elíptica em sua geometria. As velocidades geradas na região do jato ascendente são muito altas para a faixa de velocidades objetivada nas medições, indo de 5.41 m/s para a vazão de 2 L/min até 16.24 m/s para a vazão de 6 L/min. Isto faz com que a região do jato central não seja computada pela metodologia PIV (as partículas não permanecem na janela de interrogação, não permitindo o cômputo de suas velocidades), aparecendo como uma região sem velocidade (região azul). Observa-se, entretanto, que as velocidades das partículas na zona de recirculação foram

convenientemente capturadas, conforme inicialmente proposto. Essas velocidades diminuem gradativamente conforme se afastam da região central do jato e se aproximam da zona estática onde a matriz porosa encontra-se não deformada.

Para a condição estável, verifica-se que a cavidade forma um escoamento bifásico confinado no qual a água é “renovada” (isto é, injetada na cavidade e novamente permeada no meio poroso), mas as partículas sólidas em movimento permanecem as mesmas, não erodindo o meio poroso. Este estado permanente de recirculação relativamente próxima ao orifício evidencia a situação de vazamentos reais, nos quais o ponto de vazamento dificilmente é localizado rapidamente, uma vez que essa recirculação jamais aflora à superfície.

As áreas em branco na região central das Figura 42 a Figura 46 indicam a região do jato de água ascendente, cujas velocidades são impostas pela vazão de entrada pelo orifício. Resultados experimentais da presente pesquisa, que serão mostrados a frente, mostram que as velocidades do jato de água são da ordem de cem vezes as velocidades das partículas sólidas, de modo que sua representação vetorial extrapolaria os limites dos gráficos das Figura 42 a Figura 46, sobrepondo os vetores do movimento do material granular. Assim, para evitar a superposição, o jato de água foi representado como a região em branco, uma vez que o foco da utilização da técnica PIV foi justamente a zona móvel.

Como destacado anteriormente, o movimento observado nas imagens é de partículas sólidas e não do fluido. Deste modo nota-se que a água na zona móvel pode ter velocidades maiores do que a das partículas. Embora a velocidade das microesferas de vidro é nula fora dos limites da cavidade (o leito permanece estável e estático), a velocidade de água não pode ser zero ao longo de toda a borda, visto que a água injetada na cavidade permeia por todo o meio poroso.

4.4.2 Relação entre a razão de aspecto α e geometria da cavidade

A Tabela 4 apresenta as dimensões da cavidade formada na ocorrência do fenômeno da fluidização em uma camada (H) de 300 mm. Além disso são mostradas a razão de aspecto, α , e a altura adimensional da cavidade. A Figura 47 mostra a relação entre as variáveis.

Tabela 4 – Razão de aspecto e altura adimensional da camada.

Vazão [L/min]	Alt. de fluid. (αD) [mm]	Larg. de fluid. (D) [mm]	α	h ($\alpha D/H$)
0.659	5	6	0.833	0.017
2	16.9	19.3	0.876	0.056
3	18.5	21	0.881	0.062
4	20.2	22.4	0.902	0.067
5	25	27.2	0.919	0.083
6	29.4	29.8	0.987	0.098

Fonte: O autor (2020).

Figura 47 – Relação entre a razão de aspecto e altura adimensional da cavidade.

Fonte: O autor (2020).

A altura e largura de fluidização referentes ao primeiro ponto do gráfico foram medidas no teste para a obtenção da vazão mínima de fluidização. Verifica-se que a razão de aspecto pode ser bem relacionada a h através de uma equação quadrática. O valor do coeficiente de correlação múltipla, R^2 , é de 0.97, o que expressa uma boa correlação. Destaca-se que a equação obtida é empírica e válida para estas condições específicas do experimento executado, para usos gerais faz-se necessário maiores evidências experimentais.

A velocidade das partículas na zona móvel pode ser relacionada com a vazão de entrada. A Figura 48 apresenta as máximas velocidades observadas na zona móvel de acordo com o Número de Froude, determinado pela Equação (33). Os resultados mostrados confirmam que a velocidade das partículas na zona móvel aumenta conforme se dá o aumento da vazão de entrada. Além disso, a figura ainda mostra a velocidade máxima relativa em relação ao número

de Froude. A velocidade do jato para cada vazão, V_o , é determinada pela equação de continuidade para um orifício de diâmetro, D_o , igual a 2.8 mm.

Figura 48 – Máxima velocidade observada na zona móvel para as vazões de entrada e velocidade normalizada em relação a velocidade de entrada.

Fonte: O autor (2020).

O comportamento da velocidade máxima relativa decresce até atingir um valor mínimo observado entre as vazões de 4 e 5 L/min (Fr entre 65.33 e 81.66) e, após isso, apresenta uma tendência crescente para os presentes dados. Ressalta-se que a mobilidade da zona móvel sempre aumenta conforme o aumento da vazão mesmo que a razão entre a velocidade máxima do solo e jato de entrada diminua até um patamar mínimo.

Nota-se que a velocidade do jato de água ascendente é da ordem de 100 vezes maior que a velocidade das partículas. Este fato mostra que a transferência efetiva de energia cinética para as partículas é pequena, causando o movimento relativamente bem-definido do leito móvel.

4.4.3 Observações para formulação teórica mediante os resultados experimentais

A formulação teórica desenvolvida na seção 2.7 possui coeficientes a serem ajustados, como por exemplo, o fator dinâmico para a colisão do jato na parte inferior do volume de controle, θ . Schulz *et al.* (2020) expõe que este fator deve ser inserido para considerar a

incorporação de esferas vidro pelo jato de água (aumento da densidade do fluido em relação à da água); as simplificações geométricas do volume de controle e da superfície de contato; e a intensidade de reflexão (o jato da mistura é parcialmente refletido e a água penetra parcialmente no volume de controle, não sendo refletida). A Figura 49 mostra um esquema que representa os diversos fatores que interferem na determinação de θ .

Figura 49 – Aspectos que interferem na determinação do fator dinâmico θ .

Fonte: Schulz et al. (2020).

A elaboração de fatores adimensionais mediante a resultados experimentais é uma importante ferramenta de análise, tanto para o presente trabalho quanto para pesquisas futuras, que podem se valer desses dados. Além disso, como a investigação do comportamento do solo mediante um vazamento trata-se de uma temática ainda pouco explorada, a geração de dados e métricas contribui de maneira significativa ao avanço do panorama geral da pesquisa acerca do tema.

Com base no acima exposto, a formulação teórica foi aplicada utilizando os dados gerados experimentalmente, de modo que o principal fator de ajuste calibrado no presente momento foi o parâmetro θ . A Tabela 5 apresenta os fatores aplicados nas Equações (35a) a (35e).

Tabela 5 - Parâmetros utilizados nas Equações de (35a) a (35e).

ρ^*	D_o^*	K1	K2	τ^*	θ
1.503	0.009333	150	1.75	0.0317	1

Fonte: O autor (2020).

ρ^* é a razão entre a densidade da mistura e a densidade da água; D_o^* é a razão entre o diâmetro do orifício (D_o) e a altura da camada (H); $K1$ e $K2$ são os coeficientes linear e quadrático de Forchheimer adotados como sendo os valores determinados por Ergun (1952) (embora os coeficientes determinados por Ergun já considerem propriedades intrínsecas do material e apresentem diferenças em relação as constantes de Forchheimer a sua utilização apresenta uma boa quantificação dado o estágio inicial dos dados); τ^* é a tensão de cisalhamento normalizada nas paredes laterais determinada pela Equação (25) e utilizando-se a tensão de cisalhamento de 140 N/m^2 determinada por Kojima e Elliot (2012).

O coeficiente θ foi obtido por tentativas verificando-se o ajuste da curva gerada pelo equacionamento teórico para a relação bijetiva entre a altura adimensional da cavidade e o número de Froude proveniente da vazão de entrada. A Figura 50 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e a aplicação do equacionamento teórico utilizando-se os parâmetros da Tabela 5. Na elaboração da curva apresentada o valor de α foi determinado através da expressão gerada pela curva retratada na Figura 47.

Figura 50 – Relação entre a altura adimensional da cavidade gerada e o número de Froude.

Fonte: O autor (2020).

Nota-se que, como comentado, a teoria fornece a situação $h=0$ para $Fr=0$, decorrente do posicionamento do volume de controle. Dessa forma, em se aproximando de $F=0$, a curva teórica tem tendência $h \rightarrow 0$, o que não necessariamente é observado. A Figura 51 apresenta o resultado de uma análise de sensibilidade da curva de predição da geometria da cavidade em relação a variação do valor do fator dinâmico para a colisão do jato na parte inferior do volume de controle, θ .

O gráfico mostra que o número de Froude limite, isto é, aquele ao qual marca o limite para uma cavidade estável, diminui conforme θ aumenta. A Figura 52 exhibe a relação encontrada entre o Froude máximo, F_F , e o parâmetro θ . Além disso, é indicada a equação que melhor expressa o ajuste dos dados com um coeficiente de correlação igual a 0.9999.

Figura 51 – Análise de sensibilidade para a curva de predição da cavidade em relação ao fator θ .

Fonte: O autor (2020).

Figura 52 – Relação entre o fator e o Froude limite para uma cavidade estável.

Fonte: O autor (2020).

4.4.4 Erros associados nas medições via PIV

Através da técnica PIV foram obtidos os campos instantâneos de velocidade, a partir dos quais foram calculados os campos de velocidade média e os campos de desvio padrão, ambos com média no tempo. Além disso, o desvio padrão médio de cada campo, agora medido no espaço, foi tomado como uma medida do erro da velocidade das partículas em cada experimento.

Como o tempo de separação entre as imagens é muito pequeno (1/240 s) qualquer erro espacial é magnificado, uma vez que o mesmo se encontra no denominador do equacionamento. Para uma velocidade de 7 cm/s uma partícula viaja, para o tempo de 1/240 segundos, uma distância de aproximadamente 3 décimos de milímetro. Neste caso, um erro muito pequeno gera uma variação de velocidade muito grande. Deste modo optou-se por considerar o desvio padrão referente a um tempo de separação maior entre as imagens.

O desvio padrão foi determinado de acordo com as Equação (44a).

$$Dp = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(w_i - \bar{w})^2}{n}} \quad (44a)$$

Sendo:

$$w_i = \sqrt{V_{xi}^2 + V_{yi}^2} \quad (44b)$$

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{n} \quad (44c)$$

Onde Dp é o desvio padrão; w_i é a resultante de velocidade em determinado ponto do campo (raiz da soma dos quadrados das componentes V_{xi} e V_{yi}); $\bar{w}$ é a média da velocidade em cada ponto e n é o tamanho da amostra, isto é, o número de campos.

As operações foram realizadas para cada célula da matriz de resultados dos campos instantâneos, gerando a matriz de resultados de desvios apresentada na forma de mapa de cores nas Figura 53 a Figura 57. A Tabela 6 mostra um resumo dos resultados obtidos na operação contendo o desvio padrão máximo de cada caso.

Tabela 6 – Desvio padrão máximo para os campos instantâneos médios de velocidade.

Vazão [L/min]	$\bar{V}$ máx. [cm/s]	Desvio padrão máximo [cm/s]
2	3.852	0.682
3	4.130	0.809
4	4.376	0.821
5	5.637	0.936
6	8.252	1.148

Fonte: O autor (2020).

Figura 53 – Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 2 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 54 - Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 3 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 55 – Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 4 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 56 - Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 5 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Figura 57 – Desvio padrão para o campo de velocidade referente à vazão de 6 L/min.

Fonte: O autor (2020).

4.5 Resultados experimentais: orifício lateral

Na utilização do orifício lateral, além dos testes com o objetivo de visualização e a aplicação da técnica PIV foram realizadas medições com os tubos de Pitot para a determinação das distribuições de pressão excedente, velocidade na região fluidizada e energia excedente. Os resultados são apresentados nesta seção. A vazão utilizada foi de 2 L/min e a altura da camada granular de 300 milímetros. A tabela com os dados das leituras e os cálculos desenvolvidos é mostrada no apêndice I.

4.5.1 Distribuição de pressão excedente

A Figura 58 apresenta a distribuição de pressão excedente, isto é, aquela determinada através da leitura da variação do nível no tubo de visualização, para uma camada de solo de 150 mm totalmente saturada. O gráfico mostra que as maiores pressões são experimentadas na vertical mais próxima ao centro do orifício. Além disso, essas pressões máximas, em ambas as verticais, estão localizadas próximas à altura de fluidização. É importante salientar que as

alturas reais das pressões máximas podem estar um pouco acima dos valores mostrados, isso por que o grid (malha) de medição nessa região varia de 5 em 5 milímetros e, deste modo, pode ser que algum ponto entre a altura determinada como pressão máxima e a altura seguinte apresente um valor maior que não foi medido diretamente e sim estimado pela curva determinada.

Figura 58 – Distribuição de pressão excedente para uma camada de 300 mm a uma vazão de 2 L/min.

Fonte: O autor (2020).

Como observado neste trabalho e por Bailey (2015) a carga pressão excedente máxima localiza-se em um ponto próximo da altura da região fluidizada. Além disso, a Figura 58 mostra que o valor encontrado para a vertical mais próxima ao orifício localiza-se um pouco acima do valor para a vertical mais distante. Isto ocorre devido à geometria da região fluidizada que possui uma forma elíptica no plano de medição YZ, assim, para a vertical distante a 7

milímetros do orifício a altura de 25 milímetros está na região fluidizada, ao passo que para a vertical distante a 15 mm a mesma altura está em uma área fora a zona de fluidização.

Acima da altura de 70 milímetros verifica-se uma tendência suavizada para a evolução da curva de pressão excedente em ambas as verticais. Isso indica que, acima deste ponto, o escoamento é regido pela Lei de Darcy, que expressa uma relação linear entre o gradiente de pressão e a velocidade. Note-se que isto não implica em uma dependência linear entre a pressão e a distância, porque a geometria não é cartesiana. A geometria do escoamento acima da região fluidizada é uma transição entre a geometria cartesiana (mais próximo à superfície da matriz porosa) e a geometria esférica (mais próxima à região fluidizada). Se a geometria do escoamento fosse cartesiana (linhas de corrente paralelas), o decréscimo da pressão seria linear com a distância. Abaixo deste ponto (70 mm) o escoamento é tomado como não linear.

A Figura 59 mostra a possível envoltória da região fluidizada e foi determinada através da análise das alturas correspondentes aos valores máximos de pressão excedente.

Figura 59 – Envoltória estimada da geometria da região de fluidização para o orifício lateral.

Fonte: O autor (2020).

4.5.2 Distribuição de velocidade

A Figura 60 exibe a distribuição de velocidade acima do orifício. Para a vertical a uma distância de 7 milímetros do centro do orifício o gráfico mostra que as maiores velocidades ocorrem em regiões próximas ao orifício e atinge um valor máximo de 2.3 m/s. Após esse pico a velocidade decresce a uma taxa elevada até a altura de 30 milímetros e, a partir desse ponto,

continua a diminuir, porém de maneira mais suave. Já para a vertical distante a 15 mm do centro do orifício observa-se um comportamento diferente, com a velocidade iniciando com um valor de 0.6 m/s e crescendo até um valor máximo de 1.12 m/s na altura de 15 mm e, a partir desse ponto a curva passa a seguir a mesma tendência daquela verificada na vertical anterior. Uma possível explicação para isso está no fato que as velocidades medidas nas alturas de 0 e 5 milímetros estão na região fluidizada, porém fora da região de recirculação intensa, de modo que, o fluido ali presente (a velocidade medida pelos tubos de Pitot são do fluido e não das partículas) não é reinserido no jato ascendente diretamente, podendo indicar uma região de recirculação específica e a formação de um vórtice localizado.

Figura 60 – Distribuição de velocidade ao longo da altura acima do orifício lateral.

Fonte: O autor (2020).

Assim como observado na Figura 58 a partir da altura de 70 milímetros as velocidades seguem uma tendência de decréscimo mais suave, indicando, mais uma vez, que acima desse ponto considera-se que o escoamento é regido pela Lei de Darcy. Apesar da tendência mais

“bem-comportada” apresentada para altura acima de 70 milímetros, tanto para a distribuição de velocidade como para a distribuição de pressões, deve-se ter cautela na caracterização do escoamento nessa região. Isto por que o valor de Re_1 limite para o escoamento laminar é da ordem de 10, que, para as características do solo utilizado, equivale a uma velocidade de 0.025 m/s de acordo com a Equação (5). As velocidades mínimas observadas giram em torno de 0.09 m/s o que indicaria, a rigor, que o escoamento está a região de transição, porém como os valores medidos encontram-se muito próximos do limite inferior e visando uma simplificação no equacionamento pode-se considerar, neste caso, que a Lei de Darcy descreve o escoamento de maneira adequada.

A Figura 61 apresenta um esquema das resultantes de velocidade de forma vetorial. Os vetores possuem uma escala de cor e tamanho onde as menores velocidades são denotadas pela cor magenta, enquanto que as maiores são da cor verde. Há ainda, uma predição das linhas de fluxo (corrente) determinada pelo sentido dos vetores. As prováveis linhas de fluxo (corrente) definidas estão de acordo com as considerações feitas anteriormente sobre a envoltória da região fluidizada.

Figura 61 – Campo de velocidades e linhas de fluxo (corrente) para o orifício lateral.

Fonte: O autor (2020).

Como observado na seção 4.3 as partículas da zona móvel possuem um movimento de descenso, ou seja, vão do topo da região fluidizada para sua base e são inseridas no jato ascendente novamente, onde são levadas ao topo e o processo se repete. As prováveis linhas de fluxo (escoamento) da água no esquema da Figura 61 seguem o mesmo movimento. No entanto, as linhas de fluxo (corrente) e as trajetórias das partículas podem adquirir características distintas, uma vez que, ao contrário das partículas, a água percola no meio poroso e ultrapassa a envoltória da região fluidizada.

4.5.3 Distribuição de energia excedente

A energia excedente é a parcela de variação em torno da energia dita estática. A energia estática é constante em toda a camada granular e é fundamentada pelo teorema de Bernoulli, que é a soma da carga de pressão, a carga cinética e a carga de elevação. Em condições estáticas conforme a carga de elevação aumenta a pressão também aumenta, assim a elevação no tubo de visualização se mantém constante e ao mesmo nível da altura de extravasamento do tanque.

A Figura 62 mostra a distribuição de energia excedente ao longo da altura acima do orifício. A curva mostrada é determinada pela soma das cargas de pressão excedente e a carga cinética em cada ponto. O comportamento é semelhante àquele apresentado pela velocidade acima do orifício, onde a energia excedente é maior em regiões mais próximas ao orifício.

Figura 62 – Distribuição energia ao longo da altura acima do orifício lateral.

Fonte: O autor (2020).

4.6 Resultados experimentais: orifício central

Os resultados experimentais para o orifício central são apresentados através de uma análise de sensibilidade de dois grandes fatores que influenciam a região fluidizada. O objetivo da análise é verificar a influência da altura da camada granular e o efeito da vazão de entrada. A Tabela 7 mostra o esquema utilizado na investigação do comportamento da matriz porosa. Para cada fator foram medidas as distribuições de pressões excedentes, de velocidades e de energia excedente ao longo da vertical principal acima do orifício, ou seja, a vertical de coordenada Y igual a zero no grid (malha) pré-estabelecido. Os dados obtidos nos experimentos são apresentados no apêndice J.

Tabela 7 – Esquema do método para a investigação dos fatores que afetam a fluidização.

Investigação dos efeitos da vazão de entrada		Investigação dos efeitos da altura da camada	
Altura da camada	Vazão	Vazão	Altura da camada
300 mm	2 L/min	2 L/min	150 mm
	3 L/min		200 mm
	4 L/min		300 mm

Fonte: O autor (2020).

Antes da análise de sensibilidade fez-se necessário estabelecer um experimento padrão que serviu como referência na comparação dos diferentes dados obtidos por este trabalho e por Govender (2016). A altura da camada e a vazão de referência são 300 milímetros e 2L/min, respectivamente.

4.6.1 Distribuição de pressões excedentes

A Figura 63 mostra a distribuição de pressões excedentes para as verticais situadas a distâncias de 0, 10 e 20 mm do orifício central, além dos resultados de Govender (2016) para a vertical acima do orifício e uma configuração experimental similar. O gráfico mostra que as maiores pressões são experimentadas na vertical mais próxima ao centro do orifício e, conforme a distância horizontal aumenta, a magnitude das pressões diminui. As cargas máximas de pressão encontradas foram de 133 mm para a vertical Y igual a zero, 77 mm para a vertical Y igual a 10 mm e 66 mm para a vertical distante 20 mm do orifício. Na vertical Y igual a 30 mm não foram encontradas variações significativas na pressão estática, indicando que nesta região o leito permaneceu fixo e a região de fluidização termina a uma distância de 20 a 30 mm do centro do orifício. Ressalta-se que o leito se mantém fixo (sem o movimento de partículas), porém ainda ocorre a percolação de água pelo meio poroso.

Figura 63 – Distribuição de pressão excedente para uma camada de 300 mm e vazão de 2L/min.

Fonte: O autor (2020).

Os resultados encontrados são próximos aos observados por Govender (2016), havendo uma pequena diferença no fato de o ponto de maior pressão estar um pouco acima da altura de fluidização na pesquisa citada, ao passo que este ponto encontra-se abaixo da altura de fluidização no presente trabalho. Isso permite sugerir que, aproximando as conclusões das diferentes observações, o ponto de pressão máxima pode estar localizado junto à altura máxima de fluidização. Entretanto isso não é necessariamente observado nos resultados (caso devesse ser de fato uma tendência). Há interferências causadas pelos tubos de Pitot. Por exemplo, ao se inserir o tubo de Pitot no meio granular o mesmo provoca o deslocamento das partículas e, deste modo, ao adentrar a região fluidizada pode ocorrer uma alteração de sua estrutura, mesmo que mínima.

Para a vertical de Y igual a zero milímetros nota-se que acima da altura de 70 mm o comportamento da distribuição de pressão excedente possui uma tendência suavizada. Isto demonstra que acima deste ponto o escoamento pode ser encarado como laminar e regido pela lei de Darcy. Já para as curvas de Y igual a 10 e 20 mm o ponto que marca a divisão entre uma tendência linear e uma tendência não linear encontra-se próximo da altura de 40 mm, indicando

que para verticais mais distantes do orifício o ponto de mudança entre os regimes laminar e turbulento (linear e não-linear) acompanha a forma da região fluidizada, ou seja, posiciona-se mais próximo à base do leito fluidizado.

Com base nas observações expostas acima a Figura 64 exibe um esquema da configuração dos regimes de escoamento produzidos em um leito fluidizado pela ação de um jato ascendente de água através de um orifício. Salienta-se que a envoltória denotada pela linha tracejada cresce conforme a vazão de entrada aumenta.

Figura 64 –Regimes de escoamentos em um leito fluidizado pela ação de um jato ascendente.

Fonte: O autor (2020).

4.6.2 Distribuição de velocidade

A distribuição de velocidade acima do orifício é apresentada na Figura 65. Para a vertical acima do orifício central, Bailey (2015) mostrou que não há velocidades horizontais. Assim sendo, as medições de velocidade se deram somente na vertical. O gráfico mostra que o maior registro de velocidade ocorreu nas regiões mais próximas ao orifício, com o valor mais alto de aproximadamente 3.5 m/s logo acima do orifício. A velocidade diminui rapidamente com o aumento da altura e atinge um valor negativo de 0.14 m/s a uma altura de 80 mm. A presença das velocidades negativas é uma indicação de escoamento no sentido inverso ao esperado, ou seja, o escoamento no leito acima da região fluidizada seguiu um padrão que

resultou no escoamento em direção à base do tanque ao longo da linha central. Isto sugere a presença de vórtices de recirculação no próprio leito, o que corrobora as observações feitas na utilização do orifício lateral onde foi possível a visualização de pequenas células de recirculação nas partes superiores da região fluidizada.

Figura 65 – Distribuição de velocidade para uma camada de 300 mm e vazão de 2 L/min.

Fonte: O autor (2020).

4.6.3 Distribuição de energia excedente

A Figura 66 mostra a distribuição de energia excedente ao longo da altura acima do orifício. O comportamento apresentado é bastante semelhante ao comportamento apresentado pela velocidade acima do orifício, onde a energia excedente é maior em regiões mais próximas ao orifício. A energia máxima medida é aquela encontrada logo acima do orifício de entrada e possui um valor de 666 mm.

Van zyl et al. (2013) expõem que a zona fluidizada, que se desenvolve durante o vazamento em uma tubulação, atua como um mecanismo de dissipação de energia que ajuda a impedir que o vazamento atinja a superfície do solo. O gráfico corrobora esta afirmação, uma vez que verifica-se que cerca de 51% da energia gerada é dissipada na zona fluidizada. Em vazamentos reais a recirculação observada na zona fluidizada pode permanecer por anos sem

ser detectada, pois jamais aflora à superfície devido à grande dissipação de energia em uma área muito próxima à tubulação.

Figura 66 - Distribuição de energia excedente para uma camada de 300 mm e vazão de 2 L/min.

Fonte: O autor (2020).

4.6.4 Análise de sensibilidade: influência da vazão de entrada

O efeito da vazão de entrada foi investigado através da determinação das condições no leito para as vazões de 2,3 e 4 L/min com uma camada granular de altura igual a 300 milímetros.

4.6.4.1 Altura de fluidização

Os resultados observados indicam que a altura da região fluidizada aumenta de acordo com o aumento da vazão de entrada. Os valores encontrados para as vazões de 2, 3 e 4 L/min foram de 25 mm, 33 mm e 43 mm, respectivamente. A Figura 67 mostra a evolução das alturas de fluidização para as vazões utilizadas.

Ao se plotar no gráfico somente os resultados para as vazões de 2 a 4 L/min verifica-se que uma tendência linear explicaria os dados de maneira satisfatória através de um R^2 de 0.996. Porém, ao se extrapolar os dados referentes a essa tendência linear, verifica-se que uma vazão

igual a zero L/min resultaria em uma altura de fluidização acima de 10 mm, uma incoerência em termos físicos, mostrando que análises de regressão são apropriadas dentro dos limites de sua determinação. Uma vez que o presente estudo foi mais amplo, optou-se por acrescentar um ponto localizado mais próximo à origem. Assim, o ponto utilizado foi a vazão de 0.659 L/min correspondente a vazão mínima de fluidização mencionada na seção 4.2 e encontrado nos experimentos de visualização. A curva de melhor ajuste para os dados é apresentada no gráfico da Figura 67 juntamente com o seu coeficiente de correlação múltipla. Frisa-se mais uma vez que não se pretende extrapolar a região de validade da análise de regressão (restrita aos intervalos das variáveis utilizadas). Mas é interessante observar que os quatro pontos formam um conjunto mais realístico da diminuição da altura de fluidização.

Figura 67 – Evolução da altura de fluidização de acordo com a vazão de entrada.

Fonte: O autor (2020).

4.6.4.2 Distribuição de pressão excedente

A Figura 68 mostra a distribuição de pressão excedente para as diferentes vazões de entrada. Para as vazões de 3 e 4 L/min a forma da distribuição de pressão é bastante semelhante àquela encontrada no experimento padrão com uma vazão de 2 L/min, porém com valores numéricos maiores. Os valores de pressão excedente máxima aumentam à medida que a vazão de entrada é incrementada e, como no experimento padrão, são observados em alturas próximas

à altura de fluidização. Os valores máximos foram de 245 e 387 milímetros para as vazões de 3 e 4 L/min respectivamente.

Na análise do gráfico verifica-se que a tendência suave da distribuição de pressão (o que indica um regime de escoamento laminar) para a vazão de 4 L/min começa a altura de aproximadamente 100 mm, ao passo que para as vazões de 2 e 3 L/min essa tendência é observada para valores acima de 70 mm. Isto demonstra que a região de transição entre os regimes laminar e turbulento (Figura 64) é maior para vazões maiores.

Figura 68 – Distribuição de pressão excedente para diferentes vazões de entrada.

Fonte: O autor (2020).

4.6.4.3 Distribuição de velocidade

A Figura 69 exibe a distribuição de velocidade encontrada para as vazões de 2, 3 e 4 L/min. Como esperado as maiores velocidades são experimentadas em regiões mais próximas ao orifício. Além disso, nota-se que os três perfis de distribuição possuem características similares, com as altas velocidades presentes na região fluidizada e diminuindo a uma taxa elevada ao longo da altura de fluidização e, após isso, assumem uma tendência suave.

Para a vazão de 4 L/min identifica-se um comportamento anormal nas alturas de 45 e 50 mm, onde as velocidades são negativas e destoam da tendência observada para as outras vazões. A velocidade vertical negativa nesses pontos sugere a existência de uma região de recirculação intensa logo acima da altura de fluidização ou, em outras palavras, a existência de um vórtice nessa área.

Figura 69 – Distribuição de velocidade para diferentes vazões de entrada.

Fonte: O autor (2020).

4.6.4.4 Distribuição de energia excedente

A distribuição de energia excedente (soma das cargas de pressão excedente e carga cinética) para diferentes vazões é apresentada na Figura 70. A distribuição segue a mesma tendência para todas as vazões, mostrando que a energia é bastante alta em regiões próximas ao orifício e decresce rapidamente ao longo da altura. Para a vazão de 4 L/min destaca-se que a energia acima da região fluidizada permanece relativamente alta quando comparada àquelas referentes às vazões de 2 e 3 L/min.

Na avaliação acerca da dissipação de energia na região fluidizada para a vazão de 4 L/min um montante de 69% da energia é perdido na região de recirculação, enquanto que para as vazões de 2 e 3 L/min os percentuais de perda são 51% e 46% respectivamente.

Por fim, verifica-se que, aumentando a vazão de entrada, a energia em alturas mais próximas do orifício também aumenta.

Figura 70 - Distribuição de energia excedente para diferentes vazões de entrada.

Fonte: O autor (2020).

4.6.5 Análise de sensibilidade: influência da altura da camada

Os efeitos decorrentes da altura da camada granular foram analisados através da observação das condições do leito para as alturas de 300, 200 e 150 milímetros submetidas a uma vazão de 2 L/min.

4.6.5.1 Altura de fluidização

A Figura 71 expõe a evolução das alturas de fluidização mediante a variação da altura da camada granular. Os resultados observados indicam que a altura da região fluidizada experimenta uma diminuição com a redução da altura da camada. Além disso, a tendência de redução da altura é, aparentemente, linear e apresenta um R^2 de 0.94, o que assinala uma boa correlação. Os valores encontrados para as camadas de 300, 200 e 150 milímetros foram de 25 mm, 35 mm e 47 mm, respectivamente.

Figura 71 - Evolução da altura de fluidização mediante a variação da altura da camada granular.

Fonte: O autor (2020).

O comportamento observado já era esperado, uma vez que com a diminuição da altura da camada o peso imposto pela mesma, que está em sentido oposto a força exercida pelo jato ascendente, diminui e permite que as partículas em suspensão atinjam maiores alturas no leito.

4.6.5.2 Distribuição de pressão excedente

A Figura 72 mostra a distribuição de pressão excedente para as diferentes alturas da camada. O comportamento geral verificado é o mesmo para as três alturas. Os valores de pressão excedente máxima são inversamente proporcionais à altura da camada, de modo que para camadas mais altas os valores máximos de pressão são menores. Os valores máximos foram de 141 e 161 milímetros para as camadas de 200 e 150 respectivamente.

Destaca-se que a tendência suave da distribuição de pressão (o que indica um regime de escoamento laminar) para uma camada de 150 mm começa a altura de aproximadamente 100 mm, enquanto que para as camadas de 200 e 300 mm essa tendência é observada para valores menores e acima de 70 mm. Isto denota que a região de transição entre os regimes laminar e turbulento (Figura 64) é maior para camadas granulares menores. Além disso, uma camada menor exerce menos força contrária àquela provocada pelo jato ascendente e permite que um fluxo maior de água “saia” da região de recirculação intensa e adentre o leito fixo.

Figura 72 - Distribuição de pressão excedente para diferentes alturas da camada granular.

Fonte: O autor (2020).

4.6.5.3 Distribuição de velocidade

A distribuição de velocidade encontrada para as diferentes alturas da camada é mostrada na Figura 73 e segue o padrão verificado em todas as variações experimentais, nas quais as maiores velocidades são encontradas em regiões mais próximas ao orifício. Destaca-se que a altura da camada não tem efeitos significativos nas magnitudes das velocidades observadas.

De acordo com a Equação (5) o regime turbulento tem início para velocidades acima de 0.99 m/s (Re_1 maior que 500) e, deste modo observa-se que das três alturas de camada testadas a única em que o regime de transição começa ainda dentro da zona fluidizada (abaixo da altura de fluidização) é a menor delas com altura de 150 mm. Isto reforça a constatação feita na seção anterior de que a região de transição entre os regimes laminar e turbulento (Figura 64) é maior para camadas granulares menores.

Figura 73 - Distribuição de velocidade para diferentes alturas da camada granular.

Fonte: O autor (2020).

4.6.5.4 Distribuição de energia excedente

A distribuição da energia excedente determinada para as várias alturas do leito é apresentada na Figura 74. Surpreendentemente, embora a altura do leito tenha variado através das alturas de 200 e 150 mm a distribuição de energia foi notavelmente semelhante à distribuição de energia encontrada no experimento padrão. Para a altura da camada de 150 mm identifica-se uma pequena variação do comportamento entre as alturas de 35 e 100 mm e destaca-se que isso é um reflexo direto do comportamento observado na distribuição de energia apresentada na seção 4.6.5.2.

Na investigação acerca da dissipação de energia na região fluidizada para as camadas de 150 e 200 mm um montante de 85% da energia é perdido na região de recirculação, enquanto que para na camada de 300 mm o percentual de perda é de 51%. Isso demonstra que a dissipação de energia na região fluidizada é muito mais eficiente para camadas granulares maiores.

Figura 74 - Distribuição de energia excedente para diferentes alturas da camada granular.

Fonte: O autor (2020).

4.7 Outras observações

4.7.1 Perturbação causada pelos tubos de Pitot

Os tubos de Pitot utilizados nas medições provavelmente provocam alguma influência nos resultados obtidos. Essa influência pode ser causada pela interferência na movimentação das partículas em si, ou ainda, por uma possível obstrução no escoamento original do fluido dentro do leito, de modo que os tubos podem funcionar como uma barreira e desviar o escoamento de seu caminho preferencial. No entanto, a avaliação do grau de interferência dos tubos nos resultados é de difícil mensuração. A Figura 75 mostra a ponta do tubo de Pitot tipo L inserida na região de fluidização provocada por um jato ascendente durante a execução de uma medição. Na imagem verifica-se elementos citados ao longo do presente trabalho, como por exemplo a envoltória da região fluidizada prevista na Figura 64. Além disso, são indicadas

a zona móvel, a região de descenso das partículas e área do jato onde as maiores velocidades são observadas.

Figura 75 – Ponta do tubo de Pitot tipo L posicionado dentro da região de fluidização.

Fonte: O autor (2020).

Como já mencionado a presença de bolhas de ar na camada granular se mostrou um fator prejudicial ao processo, uma vez que interferia nas medições e podiam levar a resultados imprecisos. Em alguns experimentos observou-se o acúmulo de bolhas de ar nas hastes dos tubos de Pitot o que levou à interrupção dessas medições. A Figura 76 exemplifica a ocorrência desse fato.

Figura 76 – Acúmulo de bolhas de ar na haste do tubo de Pitot.

Fonte: O autor (2020).

4.7.2 Considerações acerca da estabilidade do leito fluidizado

Em um experimento adicional buscou-se verificar a influência que um agente externo teria ao se causar o rompimento da envoltória da região fluidizada. A Figura 77 mostra os estágios deste procedimento. Primeiramente realizou-se o aumento gradual da vazão de entrada até a vazão máxima de 8 L/min, que foi a maior vazão atingida pela configuração atual do equipamento, e permitiu-se que a região de recirculação se estabilizasse (Figura 77a). Após isso um agente externo ao escoamento e ao leito foi inserido, de modo a perturbar a envoltória da região fluidizada (Figura 77b e 77c). Ao se romper a envoltória da região fluidizada por uma fonte externa, a região de recirculação estável se desfaz e o jato subiu até atingir a superfície, formando uma espécie de chaminé (Figura 77d). Este tipo de estrutura é denominado exatamente de chaminé na literatura da área (Schulz *et al.*, 2020).

Figura 77 – Rompimento da envoltória da região fluidizada.

Fonte: O autor (2020).

A formação da chaminé com a introdução de um agente que perturba o meio poroso mostra o quanto a estabilidade do meio granular consegue "segurar" a cavidade. O experimento mostra que a estrutura granular tem uma resistência própria para ser desestabilizada.

Na Figura 77d observa-se a ejeção das partículas na superfície da camada ilustrando a intensidade possível de ser atingida e o início do processo de erosão do solo. Em uma analogia com uma situação real de vazamento um possível agente de perturbação pode ser a vibração provocada pelo tráfego de veículos na superfície acima da tubulação enterrada. Por mais que uma única perturbação não seja suficiente para romper a envoltória, a repetição contínua dessa perturbação pode causar o rompimento da envoltória por um processo semelhante à falha por fadiga. Deste modo, havendo um local para a água escoar, junto com a areia (solo), a erosão se

estabelecerá e poderá gerar problemas de manutenção de estruturas viárias, casas e da própria tubulação. Tudo depende da vazão do jato e das condições da matriz porosa (espessura, declividade do terreno, caminhos preferenciais para o solo erodido, por exemplo).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões do estudo mediante os resultados apresentados e uma discussão acerca da metodologia empregada no sentido de avaliar sua adequação para alcançar os objetivos propostos. Além disso, considerações e recomendações para trabalhos futuros são apresentadas.

5.1 Conclusões a respeito da técnica PIV

- a) A utilização da técnica PIV para determinação da velocidade das partículas na zona móvel pode ser utilizada e oferece resultados interessantes sobre o mecanismo hidráulico da região fluidizada, além de oferecer uma interferência mínima no escoamento;
- b) Para a determinação da velocidade das partículas na região do jato ascendente faz-se necessário a utilização de um equipamento mais robusto e que possua uma maior velocidade de captura, uma vez que a velocidade nessa área é bastante alta. Considerando uma vazão de 2 L/min a velocidade através do orifício de entrada (2.8 mm) é de 5.41 m/s. A altura de fluidização encontrada para essa vazão foi cerca de 23 mm, deste modo a câmera utilizada deve possuir uma velocidade de captura da ordem de milhares de fps para que se possa obter resultados confiáveis acerca do deslocamento das partículas na região do jato ascendente;
- c) A velocidade das partículas é bastante alta na região central e diminui gradativamente através da zona móvel em direção ao leito fixo onde a matriz porosa encontra-se não deformada;
- d) As figuras permitem afirmar que a região fluidizada segue uma forma elíptica em sua geometria;
- e) Verifica-se um estado permanente de recirculação na região próxima ao orifício de entrada (ponto de vazamento), um estado impede que o vazamento aflore a superfície;
- f) Para as condições específicas deste estudo a razão de aspecto, α , pode ser bem relacionada a h através de uma equação quadrática com bom coeficiente de

correlação. Deste modo, a curva apresentada é considerada como uma métrica importante para as relações geométricas de cavidades provocadas no fenômeno da fluidização.

- g) A transferência de energia cinética do fluido para as partículas possui pouca efetividade, acarretando em um movimento moderadamente bem definido das partículas na zona móvel.
- h) O fator dinâmico para a colisão do jato na parte inferior do volume de controle, θ , mostrou-se um importante parâmetro a ser calibrado para a adequada utilização do equacionamento teórico desenvolvido.

5.2 Conclusões sobre os resultados experimentais envolvendo tubos de Pitot e PIV

- a) A vazão mínima para a ocorrência do surgimento da primeira cavidade foi de 0.659 L/min para as condições experimentais utilizadas. Esta vazão gerou uma região fluidizada com altura de 5 mm e largura de 6 mm;
- b) Mantendo-se a altura da camada granular constante durante um mesmo experimento, e aumentando a vazão gradativamente observa-se que a altura de fluidização também aumenta;
- c) A área da região fluidizada foi relacionada de maneira diretamente proporcional à vazão de entrada para as presentes condições experimentais. Porém, apesar do coeficiente de correlação encontrado ser próximo a 1, a tendência linear não é adequada e deve ser utilizada com cuidado observando os limites de aplicação;
- d) A vazão de entrada tem considerável influência nas distribuições de pressão excedente, de velocidade e de energia excedente na vertical diretamente acima do orifício. Quanto maior a vazão de entrada maiores os valores de pressão, velocidade e energia.
- e) Os valores da distribuição de pressão acima do orifício de entrada são inversamente proporcionais à altura da camada granular. Quanto menor a camada granular maiores os valores de pressão excedente;
- f) A altura da camada não tem efeitos significativos nos valores das velocidades observadas;
- g) As distribuições de pressão mostram que, na grande maioria dos casos, a pressão excedente experimenta uma diminuição de seu valor logo acima do orifício seguida de um aumento até um valor máximo próximo da altura de fluidização;

- h) A região fluidizada pode ser vista como um mecanismo de dissipação de energia, o que impede o jato de água de penetrar mais profundamente no leito e chegar à superfície. A dissipação de energia é mais eficiente em camadas granulares mais baixas e vazões mais altas;
- i) Os regimes de escoamento experimentados ao longo da camada são (Figura 64):
 - i. Laminar para regiões mais distantes da região fluidizada (lei de Darcy);
 - ii. Região de transição entre a zona fluidizada e a zona laminar (Ergun); A região de transição é maior para vazões maiores e para camadas com alturas menores;
 - iii. Escoamento turbulento para regiões próximas ao orifício na zona fluidizada.
- j) Os resultados encontrados no orifício lateral e central seguem uma mesma tendência, mas não são exatamente correspondentes. Deste modo os resultados dos respectivos orifícios não podem ser utilizados de forma permutável;
- k) A estrutura granular possui uma resistência própria. Ao utilizar um agente externo para romper a envoltória da região fluidizada, que restringe a região de recirculação intensa, causa-se a formação de uma chaminé e consequente erosão do solo até a superfície.

5.3 Recomendação de trabalhos futuros

5.3.1 Com relação à técnica PIV

Uma vez que se concluiu que a obtenção dos campos médios de velocidades pela técnica PIV é viável, o próximo passo é a verificação da possibilidade de se obter a distribuição de pressão no leito diretamente dos campos vetoriais de velocidade provenientes do PIV. Ou seja, a questão principal a ser respondida é se existe a possibilidade de determinar o campo de pressão usando as velocidades obtidas via PIV.

Para isso seria necessário a utilização da equação de Poisson de pressão (aplicando-se o operador de divergência na equação de Navier-Stokes) que é expressa em termos de gradientes de velocidade. Assim, o objetivo principal da pesquisa seria escrever um código em uma linguagem selecionada (MATLAB ou qualquer outra linguagem mais elaborada) utilizando métodos iterativos para a solução da equação de Poisson para pressão.

A implementação de uma câmera mais veloz (em termos de velocidade de captura) e uma iluminação mais adequada seriam imprescindíveis em um estudo dessa natureza.

5.3.2 Com relação ao equipamento experimental

Possíveis trabalhos futuros podem realizar uma maior variedade experimental, avaliando efeitos de outros fatores, como por exemplo:

- Efeito da inclinação do tubo na interação solo-vazamento;
- Efeito da compactação do solo na interação solo-vazamento;
- Uso de outros meios granulares, como por exemplo, amostras de solos reais experimentando o comportamento real e não idealizado;
- Variações na geometria do furo, de modo a utilizar tubulações comerciais de transporte de água submersas no meio granular. Um esquema dessa alternativa é apresentado na Figura 78.

Figura 78 – Esquema de experimento utilizando uma tubulação comercial.

6 REFERÊNCIAS

ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água: Diagnóstico, Potencial de Ganhos com sua Redução e Propostas de Medidas Para o Efetivo Combate**. São Paulo. 2013.

ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. **Particle Image Velocimetry**. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2011. 584 p.

ALSAYDALANI, M. O. A.; CLAYTON, C. R. I. Internal Fluidization in Granular Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** , v. 140, n. 3, p. 1-10, 2014.

AMARAL, R. D. L.; CASTILHO, G. J. **Efeito da resolução de interrogação na velocimetria por imagem de partícula do tipo tomográfica na investigação do campo de velocidade da fase particulada na seção de um riser**. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ. Búzios, RJ: [s.n.]. 2012.

BAILEY, N. D.; VAN ZYL, J. E. **Experimental Investigation of Internal Fluidization due to a Vertical Water jet in a Uniform Medium**. Computer Control for Water Industry Conference, CCWI. [S.l.]: [s.n.]. 2015.

CITY OF CAPE TOWN. **Water Outlook 2018 Report**. Department of Water and Sanitation. Cape Town, p. 11. 2018.

DARCY, H. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: Exposition et Application des Principes a Suivre et des Formules a Employer dans les Questions de Distribution d'Eau**. Paris, p. 647. 1856.

DE BOER, R. **Trends in Continuum Mechanics of Porous Media (Theory and Applications of Transport in Porous Media)**. 2005. ed. Londres: Springer, 2005.

DEPUIT, J. **Etudes Théoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables (Estudos teóricos e práticos sobre o movimento das águas em canais abertos e através de terrenos permeáveis)**. 2. ed. Paris: [s.n.], 1863.

ERGUN, S. **Fluid flow through packed columns**, **Chemical Engineering Progress**. 2. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 48, 1952. 89-94 p.

FARLEY, M.; TROW, S. **Losses in Water Distribution Networks**. 1. ed. Londres: IWA , 2003.

FONTANAZZA, C. M. et al. Contaminant intrusion through leaks in water distribution system: experimental analysis. **Procedia Engineering**, v. 119, p. 426-433, 2015.

FORCHHEIMER, P. **Über die Ergiebigkeit von Brunnen-Anlagen und Sickerschlitzen". Z. Architekt.** Hannover, p. 539-563. 1886.

GAMBOA-MEDINA, M. M. **Deteção de Vazamentos e Alterações em Redes de Distribuição de Água para Abastecimento, Durante Operação, Usando Sinais de Pressão.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 130. 2017.

GIBILARO, L. G. **Fluidization Dynamics.** Oxford: Butterworth Heinemann, 2001. 256 p.

HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R.; RICHARDSON, J. F. **Chemical Engineering.** 5. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, v. 2, 2013.

HE, Y. et al. Experimental Observations on the Initiation of Sand-Bed Erosion by an Upward Water Jet. **Journal of Hydraulics Engineering**, v. 143, n. 7, 06017007-1, 2017.

HINER, W.; LAMBERT, A. **Losses form Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures.** IWA Blue Pages. [S.l.]. 2000.

HOLDICH, R. G. **Fundamentals of Particle Technology.** Loughborough: Loughborough University, 2002.

KABAASHA, A. M.; PILLER, O.; VAN ZYL, J. E. Incorporating the Modified Orifice Equation into Pipe Network Solvers for More Realistic Leakage Modeling. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 2, February 2018. ISSN 0733-9429.

KANDASAMI, K.; MURTHY, T. G. **Effect of particle shape on the mechanical response of a granular ensemble.** Conference: Geomechanics from Micro to Macro. [S.l.]: [s.n.]. 2014.

KOJIMA, T.; ELLIOT, J. A. Incipient flow properties of two-component fine powder systems and their relationships with bulk density and particle contacts. **Powder Technology**, v. 228, p. 359-370, September 2012.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering.** 2nd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991.

LAMBERT, A. **What do we know about pressure: Leakage relationship in distribution system?.** System approach to leakage control and water distribution systems management, International Water Association. Londres: [s.n.]. 2000.

LAWRENCE, A. D. **The Interaction between a Water Pipe-Leak and an Idealized Surrounding Soil**. University of Johannesburg. [S.l.]. 2008.

LI, R. et al. A Review of Methods for Burst/Leakage Detection and Location in Water Distribution Systems. **Water Science & Technology: Water Supply**, v. 15, n. 3, p. 429-441, 2015.

LIMA, A. C. D. M. **Caracterização da Estrutura Turbulenta em Escoamentos Aerados em Canal de Forte Declividade com Auxílio de Técnicas de Velocimetria a Laser**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. [S.l.]. 2003.

LOFRANO, F. C. **Escoamento em Meios Porosos: um Modelo Analítico não Darciano Baseado no Princípio da Entropia Máxima**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. [S.l.]. 2018.

MARTINS, A. A. **Fenómenos de Transporte em Meios Porosos: Escoamento Monofásico e Transporte de Massa**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia: Universidade do Porto. [S.l.]. 2006.

MAY, J. H. **Leakage, pressure and control**. Proc., BICS Int. Conf. Leakage Control Investing in Underground Assets. Alexandria: Water Environment Federation. 1994.

NETO, J. C. D. M. **O Rio ou Relação da Viagem que Faz o Capibaribe de Sua Nascente à Cidade do Recife**. [S.l.]: [s.n.], 1953.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos : EESC/USP, 2006.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. **Particle Image Velocimetry - A Practical Guide**. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

RHODES, M. **Introduction to Particle Technology**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1998.

SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de Gerenciamento para Controladores de Consumo de Água**. São Paulo. 2001.

SCHULZ, H. E. et al. **Hydraulics of fluidized cavities in porous matrixes: cavity heights and stability for upward water jets**. Artigo em revisão. Journal of Hydraulic Engineering. 2020

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANAMENTO. **Diagnóstico de Serviços de água e Esgotos - 2017**. Brasília: SNS/MDR. 2019.

SOMMER, A. E. A novel method for measuring flotation recovery by means of 4D particle tracking velocimetry. **Minerals Engineering**, v. 124, p. 116-122, Agosto 2018.

STEPHENS, I. **Níveis Econômicos de Perdas**. SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E CONTROLE DE PERDAS EM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. Recife: [s.n.]. 2002. p. 16.

SVEEN, J. K. **An introduction to MatPIV v. 1.6.1**. [S.l.]. 2004.

TANG, Y.; CHAN, D. H.; ZHU, D. Z. Numerical Investigation of Sand-Bed Erosion by an Upward Water Jet. **Journal of Engineering Mechanics**, (ASCE), v. 143, n. 9, p. 14, 2017.

TEELUCKDHARRY, S. **An Experimental Investigation of Leakage Flow Paths in Soil Surrounding Leaks in Water Distribution Systems**. MSc Thesis. University of Cape Town. [S.l.]. 2017.

TINGCHAO, Y. et al. Impact of Orifice-to-Pipe Diameter Ratio on Leakage Flow: An Experimental Study. **Water**, **11**, 2189. <https://doi.org/10.3390/w11102189>. 2019.

TOMING, G. **Development and Characterization of a Hydrodynamic Test Bed and a Digital Particle Image Velocimetry System**. Tese de Mestrado. University of Tartu. [S.l.]. 2010.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables**. DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION. Genebra. 2017.

VAN ZYL, J. E. et al. Soil fluidisation outside leaks in Water Distribution Pipes - Preliminary observations. **Water Management**, v. 166, n. 10, p. 546-555, May 2013.

WARNER S. O., S. B. L. Autocorrelation-based estimate of particle image density for diffraction limited particle images. **Measurement science and technology**, v. 25, 2014.

WIENEKE, B. **PIV Uncertainty Quantification and Beyond**. Tese de Doutorado. Delft University of Technology.. [S.l.]. 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) AND THE UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). **Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines**. [S.l.]. 2017.

ZHANG, T. et al. Experimental investigation of Forchheimer coefficients for non-Darcy flow in conglomerate-confined aquifer. **Geofluids**, v. 2018, p. 21, 2018.

Apêndice A – Caso 2-D: equação da continuidade

Continuidade:
$$\int_{cs} \rho V \cdot dA = 0 \quad (A1)$$

Para a região da cavidade:
$$V_0 A_0 = V_B A_B + V_B A_{B_L} \quad (A2)$$

$$V_0 BW = V_B BD + V_B (2\alpha DB) \quad (A3)$$

$$V_B = V_0 \frac{W}{D} \frac{1}{(1 + 2\alpha)} \quad (A4)$$

$$V_B = V_0 \frac{W}{D} \frac{1}{(1 + 2\alpha)} \quad (A5)$$

$$V_B = V_0 \frac{W^*}{h} \frac{\alpha}{(1 + 2\alpha)} \quad (A6)$$

Para o volume de controle:
$$V_0 A_0 = V_B A_{B_L} + V_E A_E \quad (A7)$$

$$V_0 BW = V_B (2\alpha DB) + V_E [BD + 2B(H - \alpha D)] \quad (A8)$$

$$V_0 W = V_0 W \frac{2\alpha}{(1 + 2\alpha)} + V_E [D + 2(H - \alpha D)] \quad (A9)$$

$$V_E \left[\frac{\alpha D}{\alpha H} + 2 \left(1 - \frac{\alpha D}{H} \right) \right] = V_0 \frac{W}{H} \left[1 - \frac{2\alpha}{(1 + 2\alpha)} \right] \quad (A10)$$

$$V_E = V_0 \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right) \frac{W^*}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]} \quad (A11)$$

$$V_E = V_B \frac{h}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]} \quad (A12)$$

Apêndice B – Caso 2-D: equação de momento

Momento:
$$F = \int_{CS} V \rho V \cdot dA \quad (B1)$$

Aplicando a equação de momento para a direção vertical:

$$\theta \rho V_0^2 W B - p_E D B + p_B D B - 2\tau B(H - \alpha D) - \rho_M g D B(H - \alpha D) = -\rho V_B^2 D B + \rho V_E^2 D B \quad (B2)$$

A primeira parcela do primeiro membro representa o efeito da colisão do jato na parte inferior do volume de controle. O parâmetro θ deve ser inserido para considerar a captação de esferas de areia ou vidro pela água, aumentando a densidade do fluido e a intensidade da reflexão (o jato da mistura é parcialmente refletido e a água parcialmente permeia o volume de controle, portanto não sendo refletido). Dividindo a equação (B2) por $\rho g H D B$ e reorganizando em grupos adimensionais (entre parênteses):

$$\alpha \theta \left(\frac{V_0^2}{gH} \right) \left(\frac{W}{H} \right) \left(\frac{H}{\alpha D} \right) + \left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H} \right) - \left(\frac{\rho_M}{\rho} \right) \left(1 - \frac{\alpha D}{H} \right) - 2\alpha \left(\frac{\tau}{\rho g H} \right) \left(\frac{H}{\alpha D} \right) \left(1 - \frac{\alpha D}{H} \right) = - \left(\frac{V_B^2}{gH} \right) + \left(\frac{V_E^2}{gH} \right) \quad (B3)$$

Resolvendo para $\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H} \right)$:
$$V_E = V_0 \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right) \left[\frac{W^*}{2\alpha + h(1 - 2\alpha)} \right]$$

$$\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H} \right) = F_r^2 \left\{ \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 \frac{W^{*3}}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]^2} - \frac{W^{*3}}{h^2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 - \alpha \theta \frac{W^{*2}}{h} \right\} + \rho^* (1 - h) + 2\alpha \frac{\tau^*}{h} (1 - h) \quad (B4)$$

Os parâmetros adimensionais são definidos como:

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g H}, \quad h = \frac{\alpha D}{H}, \quad W^* = \frac{W}{H}, \quad \rho^* = \frac{\rho_M}{\rho}, \quad F_r = \sqrt{\frac{V_0^2}{gW}}$$

Apêndice C – Caso 2-D: equação de energia

Energia:
$$Q - W = \int_{CS} \left(\frac{V^2}{2} + zg + \frac{p}{\rho} \right) \rho V \cdot dA \quad (C1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = & -\rho \frac{V_B^3 A_B}{2} + \rho \frac{V_E^3 A_E}{2} - p_B Q + p_E Q - \rho V_B A_B \left[\alpha g D + g H_W + \frac{\rho_M g}{\rho} (H - \alpha D) \right] + \\ & + \rho V_E A_B (g H + g H_W) + 2 \rho V_E B \int \left[g z + g H_W + \frac{\rho_M g}{\rho} (H - z) \right] dz \end{aligned} \quad (C2)$$

Dividindo por $\rho g H Q$ e lembrando que: $Q = V_B A_B = V_E A_E$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{\rho g H Q} = & -\frac{V_B^2}{2 g H} + \frac{V_E^2}{2 g H} + \frac{p_E - p_B}{\rho g H} - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \\ & + \frac{V_E}{V_B} (1 + H_W^*) + \frac{2 V_E}{D H V_B} \left[\frac{z^2}{2} + H_W z + \frac{\rho_M}{\rho} H z - \frac{\rho_M}{\rho} \frac{z^2}{2} \right]_{\alpha D}^H \end{aligned} \quad (C3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{\rho g H Q} = & -\frac{V_B^2}{2 g H} + \frac{V_E^2}{2 g H} + \frac{p_E - p_B}{\rho g H} - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \\ & \left[\frac{h}{2\alpha + h(1 - 2\alpha)} \right] \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (C4)$$

Onde $H_W^* = \frac{H_W}{H}$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{\rho g H Q} = & -\frac{1}{2 g W} \frac{W}{H} \left[V_0 \frac{W^*}{h} \frac{\alpha}{(1 + 2\alpha)} \right]^2 + \frac{1}{2 g W} \frac{W}{H} \left\{ V_0 \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right) \frac{W^*}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]} \right\}^2 + \\ & + \frac{p_E - p_B}{\rho g H} - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \left[\frac{h}{2\alpha + h(1 - 2\alpha)} \right] \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (C5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{\rho g H Q} = & -\frac{1}{2} F_r^2 \frac{W^{*3}}{h^2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 \frac{F_r^2 W^{*3}}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]^2} + \frac{p_E - p_B}{\rho g H} - \\ & - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \left[\frac{h}{2\alpha + h(1 - 2\alpha)} \right] \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (C6)$$

Resolvendo para $\frac{p_B - p_E}{\rho g H}$ e utilizando a formulação de Forchheimer:

$$\begin{aligned} \frac{p_B - p_E}{\rho g H} = & -\frac{1}{2} F_r^2 \frac{W^{*3}}{h^2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 \frac{F_r^2 W^{*3}}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]^2} + \frac{K_1}{2} \frac{V_B^2}{g H} + \frac{K_2}{2} \frac{V_B}{\sqrt{g H}} - \\ & - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \left[\frac{h}{2\alpha + h(1 - 2\alpha)} \right] \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (C7)$$

$$\begin{aligned} \frac{p_B - p_E}{\rho g H} = & \frac{F_r^2}{2} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right)^2 \left\{ \frac{W^{*3}}{[2\alpha + h(1 - 2\alpha)]^2} - (-K_1 + 1) \frac{W^{*3}}{h^2} \right\} + \frac{K_2}{2} F_r \frac{W^{*3/2}}{h} \left(\frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \right) - \\ & - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \left[\frac{h}{2\alpha + h(1 - 2\alpha)} \right] \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (C8)$$

Apêndice D – Caso 2-D: Previsão da evolução da cavidade

$$\begin{aligned}
 F_r^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right)^2 \frac{W^{*3}}{[2\alpha + h(1-2\alpha)]^2} - \frac{W^{*3}}{2h^2} (K_1 + 1) \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right)^2 - \alpha \theta \frac{W^{*2}}{h} \right\} - \frac{K_2}{2} F_r \frac{W^{*3/2}}{h} \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right) + \\
 + 2 \left(\rho^* + \alpha \frac{\tau^*}{h} \right) (1-h) + h + H_w^* - \frac{h}{[2\alpha + h(1-2\alpha)]} \left\{ (1 + H_w^*) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1-h^2}{2} (1-\rho^*) + (1-h)(H_w^* + \rho^*) \right] \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{D1}$$

$$\begin{aligned}
 F_r^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right)^2 \frac{W^{*3} h^2}{[2\alpha + h(1-2\alpha)]^2} - \frac{W^{*3}}{2} (K_1 + 1) \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right)^2 - \alpha \theta W^{*2} h \right\} - \frac{K_2}{2} F_r W^{*3/2} h \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right) + \\
 + 2h^2 \left(\rho^* + \alpha \frac{\tau^*}{h} \right) (1-h) + h^2 (h + H_w^*) - \frac{h^3}{[2\alpha + h(1-2\alpha)]} \left\{ (1 + H_w^*) + \frac{2\alpha}{h} \left[\frac{1-h^2}{2} (1-\rho^*) + (1-h)(H_w^* + \rho^*) \right] \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{D2}$$

$$\begin{aligned}
 F_r^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right)^2 \frac{W^{*3} h^2}{[2\alpha + h(1-2\alpha)]^2} - \frac{W^{*3}}{2} (K_1 + 1) \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right)^2 - \alpha \theta W^{*2} h \right\} - \frac{K_2}{2} F_r W^{*3/2} h \left(\frac{\alpha}{1+2\alpha} \right) + \\
 + 2\alpha \tau^* h (1-h) + h^2 (1-h) \left\{ \frac{\rho^* [3\alpha + h(2-3\alpha)] - [\alpha + h(1-\alpha)]}{2\alpha + h(1-2\alpha)} \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{D3}$$

Apêndice E – Caso 3-D: equação da continuidade

Continuidade:
$$\int_{cs} \rho V \cdot dA = 0 \quad (E1)$$

Para a região da cavidade:
$$V_0 A_0 = V_B A_B + V_B A_{B_L} \quad (E2)$$

$$V_o \pi \frac{D_o^2}{4} = V_B \pi \frac{D^2}{4} + V_B (\alpha \pi D^2) \quad (E3)$$

$$V_B = V_0 \left(\frac{D_o}{D} \right)^2 \frac{1}{(1 + 4\alpha)} \quad (E4)$$

$$V_B = V_0 \left(\frac{D_o^*}{h} \right)^2 \frac{\alpha^2}{(1 + 4\alpha)} \quad (E5)$$

Para o volume de controle:
$$V_0 A_0 = V_B A_{B_L} + V_E A_E \quad (E6)$$

$$V_o \pi \frac{D_o^2}{4} = V_B (\alpha \pi D^2) + V_E \left[\pi \frac{D^2}{4} + \pi D (H - \alpha D) \right] \quad (E7)$$

$$V_o \frac{D_o^2}{H^2} = V_0 \left(\frac{D_o^*}{h} \right)^2 \frac{4\alpha}{(1 + 4\alpha)} \left(\alpha^2 \frac{D^2}{H^2} \right) + V_E \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\alpha^2 D^2}{\alpha H^2} + 4 \frac{\alpha D}{H} \left(1 - \frac{\alpha D}{H} \right) \right] \quad (E8)$$

$$V_E = V_o \frac{D_o^{*2}}{h} \frac{\alpha^2}{(1 + 4\alpha)} \frac{1}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]} \quad (E9)$$

$$V_E = V_B \frac{h}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]} \quad (E10)$$

Apêndice F – Caso 3-D: equação de momento

Momento:
$$F = \int_{CS} V \rho V \cdot dA \quad (F1)$$

Aplicando a equação de momento para a direção vertical:

$$\theta \rho V_0^2 A_o - p_E A_B + p_B A_B - \tau \pi D (H - \alpha D) - \rho_M g A_B (H - \alpha D) = -\rho V_B^2 A_B + \rho V_E^2 A_B \quad (F2)$$

Dividindo por $\rho g H D B$ e reorganizando em grupos adimensionais (entre parênteses):

$$\theta \left(\frac{V_0^2}{g D_o} \right) \left(\frac{D_o^2}{D^2} \right) \left(\frac{D_o}{H} \right) + \left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H} \right) - \left(\frac{\rho_M}{\rho} \right) \left(1 - \frac{\alpha D}{H} \right) - \alpha \left(\frac{\tau}{\rho g H} \right) \left(\frac{H}{\alpha D} \right) \left(1 - \frac{\alpha D}{H} \right) = - \left(\frac{V_B^2}{g H} \right) + \left(\frac{V_E^2}{g H} \right) \quad (F3)$$

$$\alpha^2 \theta F_r^2 \frac{D_o^{*3}}{h^2} + \left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H} \right) - \rho^* (1 - h) - \frac{\alpha \tau^*}{h} (1 - h) = \frac{F_r^2}{h^2} \left(\frac{\alpha^2}{1 + 4\alpha} \right)^2 \frac{D_o^{*5}}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]^2} - F_r^2 \frac{D_o^{*5}}{h^4} \left(\frac{\alpha^2}{1 + 4\alpha} \right)^2 \quad (F4)$$

Resolvendo para $\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H} \right)$:

$$\left(\frac{p_B - p_E}{\rho g H} \right) = F_r^2 \left\{ \left(\frac{\alpha^2}{1 + 4\alpha} \right)^2 \frac{D_o^{*5}}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]^2 h^2} - \frac{D_o^{*5}}{h^4} \left(\frac{\alpha^2}{1 + 4\alpha} \right)^2 - \alpha^2 \theta \frac{D_o^{*3}}{h^2} \right\} + \rho^* (1 - h) + \alpha \frac{\tau^*}{h} (1 - h) \quad (F5)$$

Os parâmetros adimensionais são definidos como:

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g H}, \quad h = \frac{\alpha D}{H}, \quad D_o^* = \frac{D_o}{H}, \quad \rho^* = \frac{\rho_M}{\rho}, \quad F_r = \sqrt{\frac{V_o^2}{g D_o}}$$

Apêndice G – Caso 3-D: equação de energia

Energia:
$$Q - W = \int_{CS} \left(\frac{V^2}{2} + zg + \frac{p}{\rho} \right) \rho V \cdot dA \quad (G1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = & -\rho \frac{V_B^3 A_B}{2} + \rho \frac{V_E^3 A_E}{2} - p_B Q + p_E Q - \rho V_B A_B \left[\alpha g D + g H_W + \frac{\rho_M g}{\rho} (H - \alpha D) \right] + \\ & + \rho V_E A_B (g H + g H_W) + \rho V_E \pi D \int \left[g z + g H_W + \frac{\rho_M g}{\rho} (H - z) \right] dz \end{aligned} \quad (G2)$$

Dividindo por $\rho g H Q$ e lembrando que: $Q = V_B A_B = V_E A_E$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{\rho g H V_B A_B} = & -\frac{V_B^2}{2 g H} + \frac{V_E^2}{2 g H} + \frac{p_E - p_B}{\rho g H} - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \\ & + \frac{V_E}{V_B} (1 + H_W^*) + \frac{4 V_E}{D H V_B} \left[\frac{z^2}{2} + H_W z + \frac{\rho_M}{\rho} H z - \frac{\rho_M}{\rho} \frac{z^2}{2} \right]_{\alpha D}^H \end{aligned} \quad (G3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q} - \dot{W} - \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{\rho g V_B A_B} = & -\frac{V_B^2}{2 g H} + \frac{V_E^2}{2 g H} + \frac{p_E - p_B}{\rho g H} - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \\ & \frac{h}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]} \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{4\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (G4)$$

Resolvendo para $\frac{p_B - p_E}{\rho g H}$ e utilizando a formulação de Forchheimer:

$$\begin{aligned} \frac{p_B - p_E}{\rho g H} = & \frac{(K_1 - 1)}{2} F_r^2 \frac{D_o^{*5}}{h^4} \left(\frac{\alpha^2}{1 + 4\alpha} \right)^2 + \frac{D_o^{*5}}{2 h^2} \left(\frac{\alpha^2}{1 + 4\alpha} \right)^2 \frac{F_r^2}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]^2} + \frac{K_2}{2} F_r \frac{D_o^{*5/2}}{h^2} \frac{\alpha^2}{(1 + 4\alpha)} - \\ & - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \frac{h}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]} \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{4\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (G5)$$

$$\begin{aligned} \frac{p_B - p_E}{\rho g H} = & \frac{F_r^2}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1 + 4\alpha} \right)^2 \left\{ (K_1 - 1) \frac{D_o^{*5}}{h^4} + \frac{1}{h^2} \frac{D_o^{*5}}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]^2} \right\} + \frac{K_2}{2} F_r \frac{D_o^{*5/2}}{h^2} \frac{\alpha^2}{(1 + 4\alpha)} - \\ & - \left[h + H_W^* + \rho^* (1 - h) \right] + \frac{h}{[4\alpha + h(1 - 4\alpha)]} \left\{ (1 + H_W^*) + \frac{4\alpha}{h} \left[\frac{1 - h^2}{2} (1 - \rho^*) + (1 - h)(H_W^* + \rho^*) \right] \right\} \end{aligned} \quad (G6)$$

Apêndice H – Caso 3-D: Previsão da evolução da cavidade

$$\begin{aligned}
& F_r^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 \frac{D_o^{*5}}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]^2 h^2} - \frac{(K_1+1)}{2} \frac{D_o^{*5}}{h^4} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 - \alpha^2 \theta \frac{D_o^{*3}}{h^2} \right\} - \frac{K_2}{2} F_r \frac{D_o^{*5/2}}{h^2} \frac{\alpha^2}{(1+4\alpha)} + \\
& + \rho^* (1-h) + \alpha \frac{\tau^*}{h} (1-h) + \left[h + H_w^* + \rho^* (1-h) \right] - \\
& - \frac{h}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]} \left\{ \left(1 + H_w^* \right) + \frac{4\alpha}{h} \left[\frac{1-h^2}{2} (1-\rho^*) + (1-h) (H_w^* + \rho^*) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{D1}$$

$$\begin{aligned}
& F_r^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 \frac{D_o^{*5} h^2}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]^2} - \frac{(K_1+1)}{2} D_o^{*5} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 - \alpha^2 \theta h^2 D_o^{*3} \right\} - \frac{K_2}{2} F_r D_o^{*5/2} h^2 \frac{\alpha^2}{(1+4\alpha)} + \\
& + \rho^* h^4 (1-h) + \alpha \tau^* h^3 (1-h) + h^4 \left[h + H_w^* + \rho^* (1-h) \right] - \\
& - \frac{h^5}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]} \left\{ \left(1 + H_w^* \right) + \frac{4\alpha}{h} \left[\frac{1-h^2}{2} (1-\rho^*) + (1-h) (H_w^* + \rho^*) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{D2}$$

$$\begin{aligned}
& F_r^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 \frac{D_o^{*5} h^2}{[4\alpha + h(1-4\alpha)]^2} - \frac{(K_1+1)}{2} D_o^{*5} \left(\frac{\alpha^2}{1+4\alpha} \right)^2 - \alpha^2 \theta h^2 D_o^{*3} \right\} - \frac{K_2}{2} F_r D_o^{*5/2} h^2 \frac{\alpha^2}{(1+4\alpha)} + \\
& + h^3 (1-h) \alpha \tau^* + h^4 (1-h) \left\{ \frac{\rho^* [3\alpha + h(1-3\alpha)] - [2\alpha + h(1-2\alpha)]}{4\alpha + h(1-4\alpha)} \right\}
\end{aligned} \tag{D3}$$

Apêndice I - Resultados experimentais: orifício lateral

Y=	7 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm	vazão:	2 L/min	Altura da camada:	300 mm
				Nível da água:	443,8 mm	Pressão de entrada:	10 Psi

Leituras [mm]																						
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z]	X (posição da régua)	359,8																			
		Y (posição da régua)	563																			
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	73	83	93	103	113	133	153		
		Leitura do tubo de visão	106	121	159	167	194	243	255	250	235	228	206	199	158,2	147,1	140,92	136,5	133,6	129,1		
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y]	X (posição da régua)	354,5																			
		Y (posição da régua)	432,5																			
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	89	99	109	119	129	149	169		
		Leitura do tubo de visão	114	135	159	182	193	204	222	250	238	232	206	196	157,9	146,9	141,05	136,4	133,3	129		
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X]	X (posição da régua)	219,5																			
		Y (posição da régua)	563																			
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	89	99	109	119	129	149	169		
		Leitura do tubo de visão	246	240	232	234	237	255	244	236	226	222	204	198	158	147	141	136,5	133,5	129		

Cálculos																						
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	123	117	109	111	114	132	121	113	103	99	81	75	35	24	18	13,5	10,5	6			
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]	-132	-105	-73	-52	-44	-51	-22	14	12	10	2	-2	-0,1	-0,1	0,05	-0,1	-0,2	0			
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	-140	-119	-73	-67	-43	-12	11	14	9	6	2	1	0,2	0,1	-0,08	0	0,1	0,1			
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	272,00	224,00	146,00	119,00	87,00	63,00	33,00	28,00	21,00	16,00	4,00	3,00	0,30	0,20	0,13	0,10	0,30	0,10			

Resumo dos resultados																						
Energia [mm]	395,00	341,00	255,00	230,00	201,00	195,00	154,00	141,00	124,00	115,00	85,00	78,00	35,30	24,20	18,13	13,60	10,80	6,10				
Velocidade horizontal [m/s]	-1,6093	-1,4353	-1,1968	-1,0101	-0,9291	-1,0003	-0,6570	0,5241	0,4852	0,4429	0,1981	-0,1981	-0,0443	-0,0443	0,0313	-0,0443	-0,0626	0,0000				
Velocidade vertical [m/s]	-1,6573	-1,5280	-1,1968	-1,1465	-0,9185	-0,4852	0,4646	0,5241	0,4202	0,3431	0,1981	0,1401	0,0626	0,0443	-0,0396	0,0000	0,0443	0,0443				
Resultante de velocidade [m/s]	2,3101	2,0964	1,6925	1,5280	1,3065	1,1118	0,8046	0,7412	0,6419	0,5603	0,2801	0,2426	0,0767	0,0626	0,0505	0,0443	0,0767	0,0443				
Carga de pressão [mm]	123,0	117,0	109,0	111,0	114,0	132,0	121,0	113,0	103,0	99,0	81,0	75,0	35,0	24,0	18,0	13,5	10,5	6,0				
Pressão [Pa]	1206,63	1147,77	1069,29	1088,91	1118,34	1294,92	1187,01	1108,53	1010,43	971,19	794,61	735,75	343,35	235,44	176,58	132,435	103,005	58,86				

Y=	15 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm					vazão:	2 L/min	Altura da camada:				300 mm										
								Nível da água:	443,8 mm					Pressão de entrada:										
Leituras [mm]																								
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z]	X (posição da régua)	359,8																					
		Y (posição da régua)	554																					
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	73	83	93	103	113	133	153					
		Leitura do tubo de visão	208	208	209	210	216	230	232	215	206	190	184	171	154,5	145,5	139,5	135,2	129,7	129				
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y]	X (posição da régua)	354,5																					
		Y (posição da régua)	424,5																					
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	89	99	109	119	129	149	169					
		Leitura do tubo de visão	194	190	184	172	246	245	244	212	208	189	177	169,5	154	145	140	135	130	129				
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X]	X (posição da régua)	219,5																					
		Y (posição da régua)	555																					
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	89	99	109	119	129	149	169					
		Leitura do tubo de visão	210	201	223	223	245	244	235	209	203	186	178	170	154	145	140	135	130	129				
Cálculos																								
(Z)	Carga de elevação [mm]		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	
(P/γ)	Carga de pressão [mm]		87	78	100	100	122	121	112	86	80	63	55	47	31	22	17	12	7	6				
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]		-16	-11	-39	-51	1	1	9	3	5	3	-1	-0,5	0	0	0	0	0	0				
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]		-2	7	-14	-13	-29	-14	-3	6	3	4	6	1	0,5	0,5	-0,5	0,2	-0,3	0				
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]		18,00	18,00	53,00	64,00	30,00	15,00	12,00	9,00	8,00	7,00	7,00	1,50	0,50	0,50	0,50	0,20	0,30	0,00				
Resumo dos resultados																								
Energia [mm]			105	96	153	164	152	136	124	95	88	70	62	48,5	31,5	22,5	17,5	12,2	7,3	6				
Velocidade horizontal [m/s]			-0,5603	-0,4646	-0,8747	-1,0003	0,1401	0,1401	0,4202	0,2426	0,3132	0,2426	-0,1401	-0,0990	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
Velocidade vertical [m/s]			-0,1981	0,3706	-0,5241	-0,5050	-0,7543	-0,5241	-0,2426	0,3431	0,2426	0,2801	0,3431	0,1401	0,0990	0,0990	-0,0990	0,0626	-0,0767	0,0000				
Resultante de velocidade [m/s]			0,5943	0,5943	1,0197	1,1206	0,7672	0,5425	0,4852	0,4202	0,3962	0,3706	0,3706	0,1716	0,0990	0,0990	0,0990	0,0626	0,0767	0,0000				
Carga de pressão [mm]			87,0	78,0	100,0	100,0	122,0	121,0	112,0	86,0	80,0	63,0	55,0	47,0	31,0	22,0	17,0	12,0	7,0	6,0				
Pressão [Pa]			853,47	765,18	981	981	1196,82	1187,01	1098,72	843,66	784,8	618,03	539,55	461,07	304,11	215,82	166,77	117,72	68,67	58,86				

Apêndice J - Resultados experimentais: orifício central

Y=	0 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm	vazão:	2 L/min	Altura da camada:	300 mm
				Nível da água:	443,8 mm	Pressão de entrada:	10 Psi

Leituras [mm]																							
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z]	X (posição da régua)	359,8																				
		Y (posição da régua)	298																				
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173	193	213
		Leitura do tubo de visão	789	752	706	678	621	462	321	215	205	177	159	151	144	139	135	134	131,7	130,5	129	128	127
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y]	X (posição da régua)	Não há velocidade horizontal																				
		Y (posição da régua)																					
		Z (altura na régua)																					
		Leitura do tubo de visão																					
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X]	X (posição da régua)	221,5																				
		Y (posição da régua)	297																				
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	94	104	114	124	134	154	174	194	214	234
		Leitura do tubo de visão	182	186	239	256	254	244	221	198	194	171	150	147	141	138	136	134,5	132	130,5	129	128	127

Cálculos																						
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	59	63	116	133	131	121	98	75	71	48	27	24	18	15	13	11,5	9	7,5	6	5	4
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	607	566	467	422	367	218	100	17	11	6	9	4	3	1	-1	-0,5	-0,3	0	0	0	0
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	607,00	566,00	467,00	422,00	367,00	218,00	100,00	17,00	11,00	6,00	9,00	4,00	3,00	1,00	1,00	0,50	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00

Resumo dos resultados																					
Energia [mm]	666	629	583	555	498	339	198	92	82	54	36	28	21	16	14	12	9,3	7,5	6	5	4
Velocidade vertical [m/s]	3,4510	3,3324	3,0270	2,8774	2,6834	2,0681	1,4007	0,5775	0,4646	0,3431	0,4202	0,2801	0,2426	0,1401	-0,1401	-0,0990	-0,0767	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Resultante de velocidade [m/s]	3,4510	3,3324	3,0270	2,8774	2,6834	2,0681	1,4007	0,5775	0,4646	0,3431	0,4202	0,2801	0,2426	0,1401	-0,1401	-0,0990	-0,0767	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Carga de pressão [mm]	59,0	63,0	116,0	133,0	131,0	121,0	98,0	75,0	71,0	48,0	27,0	24,0	18,0	15,0	13,0	11,5	9,0	7,5	6,0	5,0	4,0
Pressão [Pa]	578,79	618,03	1137,96	1304,73	1285,11	1187,01	961,38	735,75	696,51	470,88	264,87	235,44	176,58	147,15	127,53	112,815	88,29	73,575	58,86	49,05	39,24

Y=	10 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm	vazão: 2 L/min										Altura da camada: 300 mm									
				Nível da água: 443,8 mm										Pressão de entrada: 10 Psi									

Leituras [mm]																							
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z']	X (posição da régua)	359,8																				
		Y (posição da régua)	308																				
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173	193	213
		Leitura do tubo de visão	165	195	183	185	180	168	168	164	153	150	148	145	140,5	138,5	134,5	133,2	130,7	130	128	128	127
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y']	X (posição da régua)	359,8																				
		Y (posição da régua)	384,5																				
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173	193	213
		Leitura do tubo de visão	156	181	151	147	150	187	183	165	158	153	147	143,5	139,5	137,2	135	133	131	130	128	128	127
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X']	X (posição da régua)	221,5																				
		Y (posição da régua)	307																				
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	94	104	114	124	134	154	174	194	214	234
		Leitura do tubo de visão	170	190	198	200	192	185	174	161	152	150	147	144	140	138	135	133	131	130	128	128	127

Cálculos																							
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	47	67	75	77	69	62	51	38	29	27	24	21	17	15	12	10	8	7	5	5	4	
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]	-14	-9	-47	-53	-42	2	9	4	6	3	0	-0,5	-0,5	-0,8	0	0	0	0	0	0	0	
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	-5	5	-15	-15	-12	-17	-6	3	1	0	1	1	0,5	0,5	-0,5	0,2	-0,3	0	0	0	0	
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	19,00	14,00	62,00	68,00	54,00	19,00	15,00	7,00	7,00	3,00	1,00	1,50	1,00	1,30	0,50	0,20	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	

Resumo dos resultados																							
Energia [mm]		66,00	81,00	137,00	145,00	123,00	81,00	66,00	45,00	36,00	30,00	25,00	22,50	18,00	16,30	12,50	10,20	8,30	7,00	5,00	5,00	4,00	
Velocidade horizontal [m/s]		-0,5241	-0,4202	-0,9603	-1,0197	-0,9078	0,1981	0,4202	0,2801	0,3431	0,2426	0,0000	-0,0990	-0,0990	-0,1253	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
Velocidade vertical [m/s]		-0,3132	0,3132	-0,5425	-0,5425	-0,4852	-0,5775	-0,3431	0,2426	0,1401	0,0000	0,1401	0,1401	0,0990	0,0990	-0,0990	0,0626	-0,0767	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
Resultante de velocidade [m/s]		0,6106	0,5241	1,1029	1,1551	1,0293	0,6106	0,5425	0,3706	0,3706	0,2426	0,1401	0,1716	0,1401	0,1597	0,0990	0,0626	0,0767	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
Carga de pressão [mm]		47,0	67,0	75,0	77,0	69,0	62,0	51,0	38,0	29,0	27,0	24,0	21,0	17,0	15,0	12,0	10,0	8,0	7,0	5,0	5,0	4,0	
Pressão [Pa]		461,07	657,27	735,75	755,37	676,89	608,22	500,31	372,78	284,49	264,87	235,44	206,01	166,77	147,15	117,72	98,1	78,48	68,67	49,05	49,05	39,24	

Y=	20 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm	vazão:	2 L/min	Altura da camada:	300 mm
				Nível da água:	443,8 mm	Pressão de entrada:	10 Psi

Leituras [mm]																					
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z]	X (posição da régua)	359,8																		
		Y (posição da régua)	318																		
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173
		Leitura do tubo de visão	160	180	183	188	174	157,5	157,5	148,7	143	141,5	140,5	138,7	137,8	135,8	135	133,5	131	130	129
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y]	X (posição da régua)	359,8																		
		Y (posição da régua)	394,5																		
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173
		Leitura do tubo de visão	161	181	180	188	176	158	157,3	149,1	142,8	140,8	140	139,2	137	136	135	133	131	130	129
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X]	X (posição da régua)	219,5																		
		Y (posição da régua)	317																		
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	94	104	114	124	134	154	174	194
		Leitura do tubo de visão	162	182	185	189	175	157	157	149	142,5	141	140	139	137	136	135	133,5	131	130	129

Cálculos																					
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	200
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	39	59	62	66	52	34	34	26	19,5	18	17	16	14	13	12	10,5	8	7	6	2
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]	-1	-1	-5	-1	1	1	0,3	0,1	0,3	-0,2	0	0,2	0	0	0	-0,5	0	0	0	0
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	-2	-2	-2	-1	-1	0,5	0,5	-0,3	0,5	0,5	0,5	-0,3	0,8	-0,2	0	0	0	0	0	0
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	3,00	3,00	7,00	2,00	2,00	1,50	0,80	0,40	0,80	0,70	0,50	0,50	0,80	0,20	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00

Resumo dos resultados																					
Energia [mm]	42,00	62,00	69,00	68,00	54,00	35,50	34,80	26,40	20,30	18,70	17,50	16,50	14,80	13,20	12,00	11,00	8,00	7,00	6,00	5,50	2,00
Velocidade horizontal [m/s]	-0,1401	-0,1401	-0,3132	-0,1401	0,1401	0,1401	0,0767	0,0443	0,0767	-0,0626	0,0000	0,0626	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0990	0,0000	0,0000	0,0000	0,0990	0,0000
Velocidade vertical [m/s]	-0,1981	-0,1981	-0,1981	-0,1401	-0,1401	0,0990	0,0990	-0,0767	0,0990	0,0990	0,0990	-0,0767	0,1253	-0,0626	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Resultante de velocidade [m/s]	0,2426	0,2426	0,3706	0,1981	0,1981	0,1716	0,1253	0,0886	0,1253	0,1172	0,0990	0,0990	0,1253	0,0626	0,0000	0,0990	0,0000	0,0000	0,0000	0,0990	0,0000
Carga de pressão [mm]	39,0	59,0	62,0	66,0	52,0	34,0	34,0	26,0	19,5	18,0	17,0	16,0	14,0	13,0	12,0	10,5	8,0	7,0	6,0	5,0	2,0
Pressão [Pa]	382,59	578,79	608,22	647,46	510,12	333,54	333,54	255,06	191,295	176,58	166,77	156,96	137,34	127,53	117,72	103,005	78,48	68,67	58,86	49,05	19,62

Y=	0 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm	vazão:	3 L/min	Altura da camada:	300 mm
				Nível da água:	443,8 mm	Pressão de entrada:	15 Psi

Leituras [mm]																							
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z]	X (posição da régua)	359,8																				
		Y (posição da régua)	298																				
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173	193	213
		Leitura do tubo de visão	902	795	756	701	668	624	597	550	273	230	166	154	146	134	130	130	128	126	125,5	124,7	123
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y]	X (posição da régua)	Não há velocidade horizontal																				
		Y (posição da régua)																					
		Z (altura na régua)																					
		Leitura do tubo de visão																					
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X]	X (posição da régua)	221,5																				
		Y (posição da régua)	297																				
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	94	104	114	124	134	154	174	194	214	234
		Leitura do tubo de visão	165	157	140	145	225	256	292	367	252	213	147,1	143	140	139	134	131	129	127	126	124	123

Cálculos																						
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	42	34	17	22	102	133	169	244	129	90	24,1	20	17	16	11	8	6	4	3	1	0
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]																					
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	737	638	616	556	443	368	305	183	21	17	18,9	11	6	-5	-4	-1	-1	-1	-0,5	0,7	0
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	737,00	638,00	616,00	556,00	443,00	368,00	305,00	183,00	21,00	17,00	18,90	11,00	6,00	5,00	4,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,70	0,00

Resumo dos resultados																					
Energia [mm]	779,00	672,00	633,00	578,00	545,00	501,00	474,00	427,00	150,00	107,00	43,00	31,00	23,00	21,00	15,00	9,00	7,00	5,00	3,50	1,70	0,00
Velocidade horizontal [m/s]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Velocidade vertical [m/s]	3,8026	3,5380	3,4765	3,3028	2,9482	2,6870	2,4462	1,8949	0,6419	0,5775	0,6089	0,4646	0,3431	-0,3132	-0,2801	-0,1401	-0,1401	-0,1401	-0,0990	0,1172	0,0000
Resultante de velocidade [m/s]	3,8026	3,5380	3,4765	3,3028	2,9482	2,6870	2,4462	1,8949	0,6419	0,5775	0,6089	0,4646	0,3431	-0,3132	-0,2801	-0,1401	-0,1401	-0,1401	-0,0990	0,1172	0,0000
Carga de pressão [mm]	42,0	34,0	17,0	22,0	102,0	133,0	169,0	244,0	129,0	90,0	24,1	20,0	17,0	16,0	11,0	8,0	6,0	4,0	3,0	1,0	0,0
Pressão [Pa]	412,02	333,54	166,77	215,82	1000,62	1304,73	1657,89	2393,64	1265,49	882,9	236,421	196,2	166,77	156,96	107,91	78,48	58,86	39,24	29,43	9,81	0

Y=	0 mm	Leitura de pressão estática: 123 mm	vazão:		4 L/min	Altura da camada:		300 mm
			Nível da água:		443,8 mm	Pressão de entrada:		20 Psi

Leituras [mm]																								
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z]	X (posição da régua)	359,8																					
		Y (posição da régua)	298																					
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173	193	213	
		Leitura do tubo de visão	1396	1257	1125	1074	985	948	877	821	550	344	509	452	359,5	263,7	200	184,2	165	154	147,2	145	135	
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y]	X (posição da régua)	Não há velocidade horizontal																					
		Y (posição da régua)																						
		Z (altura na régua)																						
		Leitura do tubo de visão																						
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X]	X (posição da régua)	219,5																					
		Y (posição da régua)	297																					
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	94	104	114	124	134	154	174	194	214	234	
		Leitura do tubo de visão	163	156	159	170	180	204	218	280	368	450	510	451	360	264	201	184	165	154	147	145	135	

Cálculos																						
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	40	33	36	47	57	81	95	157	245	327	387	328	237	141	78	61	42	31	24	22	12
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]	-163	-156	-159	-170	-180	-204	-218	-280	-368	-450	-510	-451	-360	-264	-201	-184	-165	-154	-147	-145	-135
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	1233	1101	966	904	805	744	659	541	182	-106	-1	1	-0,5	-0,3	-1	0,2	0	0	0,2	0	0
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	1233,00	1101,00	966,00	904,00	805,00	744,00	659,00	541,00	182,00	106,00	1,00	1,00	0,50	0,30	1,00	0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00

Resumo dos resultados																						
Energia [mm]		1273,00	1134,00	1002,00	951,00	862,00	825,00	754,00	698,00	427,00	433,00	388,00	329,00	237,50	141,30	79,00	61,20	42,00	31,00	24,20	22,00	12,00
Velocidade horizontal [m/s]																						
Velocidade vertical [m/s]		4,9185	4,6478	4,3535	4,2115	3,9742	3,8206	3,5958	3,2580	1,8897	-1,4421	-0,1401	0,1401	-0,0990	-0,0767	-0,1401	0,0626	0,0000	0,0000	0,0626	0,0000	0,0000
Resultante de velocidade [m/s]		4,9185	4,6478	4,3535	4,2115	3,9742	3,8206	3,5958	3,2580	1,8897	1,4421	0,1401	0,1401	0,0990	0,0767	0,1401	0,0626	0,0000	0,0000	0,0626	0,0000	0,0000
Carga de pressão [mm]		40,0	33,0	36,0	47,0	57,0	81,0	95,0	157,0	245,0	327,0	387,0	328,0	237,0	141,0	78,0	61,0	42,0	31,0	24,0	22,0	12,0
Pressão [Pa]		392,4	323,73	353,16	461,07	559,17	794,61	931,95	1540,17	2403,45	3207,87	3796,47	3217,68	2324,97	1383,21	765,18	598,41	412,02	304,11	235,44	215,82	117,72

Y=	0 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm	vazão: 2 L/min										Altura da camada: 200 mm									
				Nível da água: 443,8 mm										Pressão de entrada: 10 Psi									

Leituras [mm]																							
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z']	X (posição da régua)	359,8																				
		Y (posição da régua)	298																				
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173	193	213
		Leitura do tubo de visão	781	724	657	610	584	471	338	220	192	170	165	155	147	135	133	134	131	129	127	126	125,5
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y']	X (posição da régua)	Não há velocidade horizontal																				
		Y (posição da régua)																					
		Z (altura na régua)																					
		Leitura do tubo de visão																					
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X']	X (posição da régua)	221,5																				
		Y (posição da régua)	297																				
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	94	104	114	124	134	154	174	194	214	234
		Leitura do tubo de visão	195	191	202,5	214	238	264	244	208	185	168	159	152	145	138	135	133	130	128	126,5	126	124

Cálculos																						
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	72	68	79,5	91	115	141	121	85	62	45	36	29	22	15	12	10	7	5	3,5	3	1
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]																					
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	586	533	454,5	396	346	207	94	12	7	2	6	3	2	-3	-2	1	1	1	0,5	0	1,5
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	586,00	533,00	454,50	396,00	346,00	207,00	94,00	12,00	7,00	2,00	6,00	3,00	2,00	3,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,00	1,50
Resumo dos resultados																						
Energia [mm]		658,00	601,00	534,00	487,00	461,00	348,00	215,00	97,00	69,00	47,00	42,00	32,00	24,00	18,00	14,00	11,00	8,00	6,00	4,00	3,00	2,50
Velocidade horizontal [m/s]																						
Velocidade vertical [m/s]		3,3908	3,2338	2,9862	2,7874	2,6055	2,0153	1,3580	0,4852	0,3706	0,1981	0,3431	0,2426	0,1981	-0,2426	-0,1981	0,1401	0,1401	0,1401	0,0990	0,0000	0,1716
Resultante de velocidade [m/s]		3,3908	3,2338	2,9862	2,7874	2,6055	2,0153	1,3580	0,4852	0,3706	0,1981	0,3431	0,2426	0,1981	-0,2426	-0,1981	0,1401	0,1401	0,1401	0,0990	0,0000	0,1716
Carga de pressão [mm]		72,0	68,0	79,5	91,0	115,0	141,0	121,0	85,0	62,0	45,0	36,0	29,0	22,0	15,0	12,0	10,0	7,0	5,0	3,5	3,0	1,0
Pressão [Pa]		706,32	667,08	779,895	892,71	1128,15	1383,21	1187,01	833,85	608,22	441,45	353,16	284,49	215,82	147,15	117,72	98,1	68,67	49,05	34,335	29,43	9,81

Y=	0 mm	Leitura de pressão estática:	123 mm	vazão:	2 L/min	Altura da camada:	150 mm
				Nível da água:	443,8 mm	Pressão de entrada:	10 Psi

Leituras [mm]																							
Pitot reto	Energia total vertical (Hv) [eixo Z']	X (posição da régua)	359,8																				
		Y (posição da régua)	298																				
		Z (altura na régua)	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108	118	133	153	173	193	213
		Leitura do tubo de visão	847	801	740	625	581	496	335	281	295,2	260	244	199	182,4	151	139	133	132	131	129,5	130	128,8
Pitot tipo L	Energia total horizontal (Hv) [eixo Y']	X (posição da régua)	Não há velocidade horizontal																				
		Y (posição da régua)																					
		Z (altura na régua)																					
		Leitura do tubo de visão																					
	Carga piezométrica (P/γ + Z) [eixo X']	X (posição da régua)	219,5																				
		Y (posição da régua)	563																				
		Z (altura na régua)	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	84	94	104	114	124	134	154	174	194	214	234
		Leitura do tubo de visão	158	145	154	178	197	212	241	265	284	254	227	195	173	156	141	134	133	132	130	130	129

Cálculos																						
(Z)	Carga de elevação [mm]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
(P/γ)	Carga de pressão [mm]	35	22	31	55	74	89	118	142	161	131	104	72	50	33	18	11	10	9	7	7	6
(v _h ² /2g)	Carga cinética na horizontal [mm]	-158	-145	-154	-178	-197	-212	-241	-265	-284	-254	-227	-195	-173	-156	-141	-134	-133	-132	-130	-130	-129
(v _v ² /2g)	Carga cinética na vertical [mm]	689	656	586	447	384	284	94	16	11,2	6	17	4	9,4	-5	-2	-1	-1	-1	-0,5	0	-0,2
(v ² /2g)	Carga cinética [mm]	689,00	656,00	586,00	447,00	384,00	284,00	94,00	16,00	11,20	6,00	17,00	4,00	9,40	5,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,00	0,20

Resumo dos resultados																						
Energia [mm]	724,00	678,00	617,00	502,00	458,00	373,00	212,00	158,00	172,20	137,00	121,00	76,00	59,40	38,00	20,00	12,00	11,00	10,00	7,50	7,00	6,20	
Velocidade horizontal [m/s]																						
Velocidade vertical [m/s]	3,6767	3,5876	3,3908	2,9614	2,7448	2,3605	1,3580	0,5603	0,4688	0,3431	0,5775	0,2801	0,4295	-0,3132	-0,1981	-0,1401	-0,1401	-0,1401	-0,1401	-0,0990	0,0000	-0,0626
Resultante de velocidade [m/s]	3,6767	3,5876	3,3908	2,9614	2,7448	2,3605	1,3580	0,5603	0,4688	0,3431	0,5775	0,2801	0,4295	0,3132	0,1981	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401	0,0990	0,0000	0,0626
Carga de pressão [mm]	35,0	22,0	31,0	55,0	74,0	89,0	118,0	142,0	161,0	131,0	104,0	72,0	50,0	33,0	18,0	11,0	10,0	9,0	7,0	7,0	6,0	
Pressão [Pa]	343,35	215,82	304,11	539,55	725,94	873,09	1157,58	1393,02	1579,41	1285,11	1020,24	706,32	490,5	323,73	176,58	107,91	98,1	88,29	68,67	68,67	58,86	