

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

João Pedro Paludo Bocchi

**BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO  
TRANSIENTE EM REDES URBANAS DE DRENAGEM PLUVIAL**

Santa Maria, RS

2020

**João Pedro Paludo Bocchi**

**BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO TRANSIENTE EM  
REDES URBANAS DE DRENAGEM PLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli  
Coorientador: Prof. Dr. José Goes de Vasconcelos Neto

Santa Maria, RS  
2020

**João Pedro Paludo Bocchi**

**BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO TRANSIENTE EM  
REDES URBANAS DE DRENAGEM PLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para  
obtenção do grau de **Bacharel em  
Engenharia Civil.**

**Aprovado em 10 de janeiro de 2020:**

---

**Daniel Gustavo Allasia Picilli, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**João Francisco Carlexo Horn, Dr. (UFSM)**

---

**Raviel Eurico Basso, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2020

*Olhem de novo esse ponto. É aqui, é a nossa casa, somos nós. Nele, todos a quem ama, todos a quem conhece, qualquer um sobre quem você ouviu falar, cada ser humano que já existiu, viveram as suas vidas. O conjunto da nossa alegria e nosso sofrimento, milhares de religiões, ideologias e doutrinas econômicas confiantes, cada caçador e coletor, cada herói e covarde, cada criador e destruidor da civilização, cada rei e camponês, cada jovem casal de namorados, cada mãe e pai, criança cheia de esperança, inventor e explorador, cada professor de ética, cada político corrupto, cada "superestrela", cada "líder supremo", cada santo e pecador na história da nossa espécie viveu ali - em um grão de pó suspenso num raio de sol.*

*A Terra é um cenário muito pequeno numa vasta arena cósmica. Pense nos rios de sangue derramados por todos aqueles generais e imperadores, para que, na sua glória e triunfo, pudessem ser senhores momentâneos de uma fração de um ponto. Pense nas crueldades sem fim infligidas pelos moradores de um canto deste pixel aos praticamente indistinguíveis moradores de algum outro canto, quão frequentes seus desentendimentos, quão ávidos de matar uns aos outros, quão veementes os seus ódios.*

*As nossas posturas, a nossa suposta auto-importância, a ilusão de termos qualquer posição de privilégio no Universo, são desafiadas por este pontinho de luz pálida. O nosso planeta é um grão solitário na imensa escuridão cósmica que nos cerca. Na nossa obscuridade, em toda esta vastidão, não há indícios de que vá chegar ajuda de outro lugar para nos salvar de nós próprios.*

*A Terra é o único mundo conhecido, até hoje, que abriga vida. Não há outro lugar, pelo menos no futuro próximo, para onde a nossa espécie possa emigrar. Visitar, sim. Assentar-se, ainda não. Gostemos ou não, a Terra é onde temos de ficar por enquanto.*

*Já foi dito que astronomia é uma experiência de humildade e criadora de caráter. Não há, talvez, melhor demonstração da tola presunção humana do que esta imagem distante do nosso minúsculo mundo. Para mim, destaca a nossa responsabilidade de sermos mais amáveis uns com os outros, e para preservarmos e protegermos o "pálido ponto azul", o único lar que conhecemos até hoje.*

*(Carl Sagan)*

## RESUMO

### BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO TRANSIENTE EM REDES URBANAS DE DRENAGEM PLUVIAL

**AUTOR: João Pedro Paludo Bocchi**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli**

Eventos de chuvas intensas são caracterizados por uma alta geração de escoamento superficial, que por sua vez gera grandes variações de vazões, por vezes bruscas, em redes de drenagem. Os transientes hidráulicos gerados por essa variação de vazão podem ocasionar uma mudança de regime de escoamento, de superfície livre para conduto forçado. Assim, o presente trabalho busca elaborar um *data set* de parâmetros experimentais relativos à ocorrência de um transiente hidráulico, gerado a partir da interrupção brusca do escoamento em um ponto, em um trecho experimental de rede de drenagem em escala reduzida. O aparato experimental consiste em um trecho principal, compreendido por um tubo tronco com descarga livre em sua extremidade de jusante, e um trecho lateral que encontra o trecho principal ortogonalmente. Foram realizadas três variações de declividades e três variações vazões de entrada em ambos os trechos a montante da junção dos mesmos. Os trechos possuem variação desses parâmetros de forma independente. A interrupção brusca do escoamento foi ocasionada por um fechamento rápido de uma válvula guilhotina localizada na extremidade de jusante do trecho principal. O banco de dados foi composto com séries de pressões e perímetros de ar em diferentes trechos do sistema para todas as condições experimentais. A partir destes dados foi possível o cálculo de outros parâmetros do sistema, como a profundidade do escoamento e carga piezométrica. Os dados de séries de pressões foram adquiridos através de sensores de pressão piezoresistivos localizados em 6 pontos do sistema com uma taxa de aquisição de dados de 10 Hz e os dados de perímetro de ar foram obtidos através da medição desse parâmetro em trechos de tubulação transparente em 9 seções do sistema. Além disso, foram capturadas tomadas de vídeo em todas as corridas experimentais, possibilitando uma avaliação visual posterior do experimento. Foram simuladas 72 condições experimentais e todas foram realizadas em triplicata. Por fim, destaca-se a elaboração de *data sets* experimentais organizados de maneira lógica e sistemática, possibilitando ao usuário um acesso fácil e rápido. Desta maneira, possibilitar-se-á a comparação dos dados obtidos experimentalmente com dados obtidos em simulações numéricas computacionais em diversos modelos.

**Palavras-chave:** Transientes Hidráulicos. Data set Experimental. Drenagem Urbana.

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL DATASET OF TRANSIENT FLOW IN URBAN STORMWATER DRAINAGE SYSTEMS**

**AUTHOR: João Pedro Paludo Bocchi**

**ADVISOR: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli**

Heavy rainfall events are characterized by high runoff generation, which turns in large, sometimes sudden, flow fluctuations in drainage networks. The hydraulic transients generated by this flow variation may cause a flow regime transition from free surface flows to pressurized ones. Therefore, the present work aims to elaborate a data set of experimental parameters related to the occurrence of a hydraulic transient, generated from the sudden interruption of the flow in one point, in an experimental small-scale drainage system. The experimental apparatus consists of a main conduit, made of a free-flowing pipe at its downstream end, and a lateral conduit that meets the main section orthogonally in a junction. Three slope variations and three inlet flow variations were performed in both lines upstream of the junction. The lines have variation of these parameters independently. The sudden interruption of the flow was made by a quick closing of a knife gate valve located at the downstream end of the main conduit. The database was composed of pressure series and air perimeters in different sections of the system for all experimental conditions. From these data it was possible to calculate other system parameters, such as flow depth and piezometric head. The pressure series data were acquired through piezoresistive pressure sensors located at 6 points of the system with a data acquisition rate of 10 Hz and the air perimeter data were obtained by measuring this parameter in transparent pipe sections in 9 sections of the system. In addition, video shots were captured in all experimental runs, enabling a later visual evaluation of the experiment. 72 experimental conditions were simulated and all were performed in triplicate. Finally, we highlight the elaboration of experimental data sets organized in a logical and systematic manner, allowing the user an easy and rapid access. Hence, it will be possible to compare experimentally obtained data with data obtained in computational numerical simulations in several models.

**Keywords:** Hydraulic Transients. Experimental Data Sets. Urban Drainage.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do caso ocorrido em Hamilton (Canadá) ...	15
Figura 2 – Layout do sistema TARP da cidade de Chicago (USA) .....	16
Figura 3 – Representação esquemática de um trecho da rede de drenagem da cidade de Edmonton, (USA).....	17
Figura 4 – Experimento realizado por Trajkovic et al. (1999) .....	19
Figura 5 – Experimento realizado por Li e McCorquodale (1999) .....	20
Figura 6 – Experimento realizado por Zhou, Hicks e Steffler (2002) .....	21
Figura 7 – Dispositivos ensaiados por Hager e Gisonni (2005).....	22
Figura 8 – Aparato experimental utilizado por Ferreri, Freni e Tomaselli (2010) e Ferreri, Ciraolo e Lo Re (2014).....	23
Figura 9 – Experimento realizado por Vasconcelos e Wright (2011).....	23
Figura 10 – Experimento realizado por Aureli et al. (2015) .....	24
Figura 11 – Localização e dimensões dos trechos, em metros.....	25
Figura 12 – Representação e nomenclatura dos trechos de ensaio. ....	26
Figura 13 – Layout experimental. ....	27
Figura 14 – Vertedores de alimentação. ....	28
Figura 15 – Detalhes e dimensões do vertedor V1, em centímetros.....	28
Figura 16 – Sistema de controle de vazões .....	30
Figura 17 – Vista lateral das tubulações de montante. Escala não representativa ...	31
Figura 18 – Localização dos trechos de tubulação de PC .....	32
Figura 19 – Válvula guilhotina .....	34
Figura 20 – Fluxograma relativo às corridas experimentais. ....	35
Figura 21 – Seções de medição do perímetro seco: Montante (a), Médio (b) e Jusante (c). Método de medição em (d).....	36
Figura 22 – Localização dos sensores de pressão relativo a pontos chaves do aparato experimental. Dimensões em centímetros. ....	38
Figura 23 – Em (a), fixação dos sensores nas tubulações e em (b), detalhe da placa Arduino.....	39
Figura 24 – Representação do modelo de avaliação visual.....	40
Figura 25 – Séries de pressões para declividades de 1% e 1% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	54

Figura 26 – Séries de pressões para declividades de 1% e 2% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	54
Figura 27 – Séries de pressões para declividades de 1% e 3% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	55
Figura 28 – Séries de pressões para declividades de 2% e 1% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	55
Figura 29 – Séries de pressões para declividades de 2% e 2% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	56
Figura 30 – Séries de pressões para declividades de 2% e 3% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	56
Figura 31 – Séries de pressões para declividades de 3% e 1% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	57
Figura 32 – Séries de pressões para declividades de 3% e 2% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	57
Figura 33 – Séries de pressões para declividades de 3% e 3% nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	58
Figura 34 – Pontos característicos das séries de pressões .....	59
Figura 35 – Séries de pressões para vazões inteira nos trechos TPM e TLM .....	60
Figura 36 – Ocorrência de ressaltos hidráulicos nos trechos TPM e TLM antes do fechamento da válvula guilhotina .....	61
Figura 37 – Enchimento das tubulações para vazão inteira e zero nos trechos TPM e TLM, respectivamente .....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DN	Diâmetro Nominal
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FP	<i>Full Pipe</i>
PC	Policarbonato
PV	Poço de Visita
PVC	Policloreto de Vinila
SN	Série Normal
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TARP	<i>Tunnel and Reservoir Plant</i>
TLM	Trecho Lateral de Montante
TPJ	Trecho Principal de Jusante
TPM	Trecho Principal de Montante
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USA	<i>United States of America</i>
V1	Vertedor 1
V2	Vertedor 2
-	Vazão Nula

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	11
2.1 TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM REDES DE DRENAGEM PLUVIAL URBANAS .....	11
2.2 COMPLICAÇÕES OCASIONADAS POR TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM REDES DE DRENAGEM PLUVIAL URBANAS .....	13
2.2.1 Hamam e McCorquodale (1982) .....	14
2.2.2 Guo e Song (1990) .....	15
2.2.3 Zhou, Hicks e Steffler (2002) .....	17
2.3 EXPERIMENTOS FÍSICOS RELACIONADOS A TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM REDES DE DRENAGEM .....	18
2.3.1 Trajkovic et al. (1999) .....	18
2.3.2 Li e McCorquodale (1999) .....	19
2.3.3 Zhou, Hicks e Steffler (2002) .....	20
2.3.4 Hager e Gisonni (2005).....	21
2.3.5 Ferreri, Freni e Tomaselli (2010). Ferreri, Ciraolo e Lo Re (2014).....	22
2.3.6 Vasconcelos e Wright (2011).....	23
2.3.7 Aureli et al. (2015).....	24
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	25
3.1 APARATO EXPERIMENTAL.....	25
3.1.1 Concepção geral do experimento .....	25
3.1.2 Sistema de Alimentação .....	27
3.1.3 Sistema de Condução .....	30
3.1.4 Conectores e válvulas.....	32
3.2 COLETA DE DADOS .....	34
3.2.1 Organização das Corridas Experimentais.....	34
3.2.2 Dados de Vazão e Altura da Profundidade do Escoamento Antes do Regime Transiente .....	36
3.2.3 Série de Pressões .....	37
3.2.4 Avaliação Visual .....	40
3.3 ANÁLISE DE ERROS.....	41
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	44
4.1 INDEXAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DE DADOS.....	44

4.2 PROFUNDIDADE DO ESCOAMENTO ANTES DO TRANSIENTE HIDRÁULICO .....	45
4.3 SÉRIES DE PRESSÕES.....	52
4.4 ANÁLISES QUALITATIVAS DE CASOS SIGNIFICATIVOS .....	60
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>64</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Modelar matematicamente determinados fenômenos físicos pode-se tornar uma tarefa árdua quando estes fenômenos possuem uma natureza complexa. Na engenharia hidráulica, transientes hidráulicos enquadram-se nesses tipos de fenômenos. Uma vez que transientes hidráulicos são caracterizados por mudanças bruscas de suas características dentro de um volume de controle em análise, isso já torna a sua descrição matemática uma tarefa árdua.

Entretanto, por vezes, a ocorrência desses fenômenos é caracterizada não somente pela ocorrência de escoamentos com apenas um tipo de fluido, mas também por escoamentos mistos de água e ar, dificultando ainda mais a descrição do fenômeno. Por serem fluídos de características muito distintas, modelar situações que contemplem condições de escoamento misto requerem a utilização de modelos matemáticos complexos, além de soluções numéricas computacionalmente onerosas. Assim, modelar numericamente escoamentos mistos é um dos desafios atuais da engenharia hidráulica.

Destaca-se, no entanto, que a validação de determinado modelo depende de que este seja testado e acurado. Como parte desse processo de validação, o ato de observar o fenômeno e mensurá-lo de forma precisa, torna-se uma etapa primordial. Assim, nota-se a importância da obtenção de dados consistentes, que possibilitem comparar os dados observados no fenômeno físico aos resultados gerados no modelo em análise.

O *status quo* da pesquisa científica alusivo à engenharia hidráulica está estreitamente relacionado à hidráulica computacional. Esse cenário manifesta-se devido a dois principais motivos: um primeiro, relacionado ao advento de computadores com melhores capacidades de processamento e memória, os quais permitem a implantação de modelos numéricos mais robustos e computacionalmente onerosos; e, um segundo, relacionado à praticidade e logística. Torna-se muito mais simples, em termos de disponibilidade de espaço e recursos financeiros, desenvolver pesquisa em meio computacional. Evidencia-se, desta maneira, a importância do desenvolvimento de modelos numéricos computacionais cada vez mais precisos e acurados, os quais tornam a prática de engenharia mais célere e menos onerosa em termos financeiros.

Todavia, a necessidade da provisão de dados para estes modelos é vigente. A obtenção, publicação e divulgação de *datasets* com resultados experimentais torna-se cada vez mais necessária. Este panorama também se apresenta à engenharia hidráulica e drenagem urbana. Embora haja certa assiduidade no monitoramento hidrometeorológico, que abastecem bancos de dados que também são utilizados na hidráulica e na drenagem urbana, a pesquisa nestas áreas carece de dados de relação direta, como medições de nível da água, pressões e velocidades. Em contraponto a esta necessidade apresenta-se a dificuldade da obtenção destes dados. Além da estrutura física a ser monitorada, necessita-se também de uma boa instrumentação e de uma equipe para este monitoramento, fatos que dificultam a geração de *datasets* experimentais.

O presente trabalho, dessa forma, tem como objetivo geral criar um banco de dados relativo a um transiente hidráulico - ocasionado pela interrupção brusca do escoamento em um ponto - em um trecho de uma rede de drenagem pluvial experimental em escala reduzida. Este banco de dados constará com valores de variações de pressão no tempo em diferentes pontos da rede, profundidades de escoamento antes da ocorrência do transiente hidráulico, além de outras análises qualitativas, possibilitadas através de vídeos e notas tomadas durante as análises experimentais. Os objetivos específicos, por sua vez, consistem em organizar e analisar, de forma geral, os dados mencionados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM REDES DE DRENAGEM PLUVIAL URBANAS

Pode-se caracterizar um escoamento em superfície livre, basicamente, através de sua velocidade média, ainda que exista um perfil de velocidades em certa seção, e sua profundidade ao longo da dimensão longitudinal do canal (POTTER; WIGGERT, 2011). Dentro desta análise, pode-se classificar o escoamento conforme dois atributos: permanente ou não permanente; uniforme ou não uniforme, conforme demonstra a Tabela 1. O escoamento não permanente também pode ser denominado como escoamento transiente, termo que será utilizado no presente trabalho.

Tabela 1 - Tipos de Escoamento

<b>Tipo de escoamento</b>	<b>Velocidade Média</b>	<b>Profundidade</b>
Permanente, Uniforme	$V = \text{constante}$	$y = \text{constante}$
Permanente, Não uniforme	$V = V(x)$	$y = y(x)$
Não Permanente, Uniforme	$V = V(t)$	$y = y(t)$
Não Permanente, Não Uniforme	$V = V(x,t)$	$y = y(x,t)$

Fonte: (POTTER; WIGGERT, 2011, p. 383).

A nível de projeto, para fins de praticidade, alguns manuais abordam diretrizes que permitem a atribuição de um escoamento permanente e uniforme dentro dos condutos e galerias, possibilitando a utilização de equacionamentos mais simples no dimensionamento, tal como é explicitado pelo DNIT (2006), em seu Manual de Drenagem de Rodovias. Além disso, nesses casos, redes de drenagem são projetadas para funcionarem como escoamentos em superfície livre e em regime fluvial, além de serem evitadas condições que causam curvas de remanso dentro da rede.

Outras bibliografias, tal como o Manual de Diretrizes Básicas para Projetos e Drenagem no Município de São Paulo, já recomendam a utilização de equações referentes ao regime permanente e uniforme, tal como a equação de Manning, apenas em níveis de pré-dimensionamento. No que diz respeito ao cálculo da linha d'água de

projeto, por sua vez, recomenda-se a utilização de equações de regime permanente e gradualmente variado (RAMOS; DE BARROS; PALOS, 1999).

Ademais, a fim de obter resultados mais precisos, pode-se ainda utilizar modelos matemáticos mais precisos para avaliar a propagação de vazões em redes de drenagem urbana. Um dos modelos matemáticos mais conhecidos são as equações de Saint-Venant, as quais são um par de equações diferenciais hiperbólicas que representam, unidimensionalmente, a continuidade e conservação do momento linear do escoamento (CUNGE et al., 1980; STURM, 2001; CHAUDHRY, 2007; POPESCU, 2014). Para canais prismáticos e sem contribuições laterais estas equações são representadas por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$Q_T + \left( \frac{Q^2}{A} + gh_c A \right)_x = gA(S_o - S_f) \quad (2)$$

Diversos modelos numéricos são utilizados para a solução destas equações, tal como o método das características e o método das diferenças finitas.

Todavia, o projetista não necessariamente tem de possuir conhecimentos aprofundados em soluções numéricas para utilizar modelos matemáticos mais complexos. Com o advento de melhores capacidades de memória e processamento dos computadores, diversos *softwares* e códigos com a implementação de modelos baseados nestas equações foram desenvolvidos e divulgados. Muitos destes *softwares* possuem código aberto, possibilitando a utilização gratuita pelos usuários.

Um dos *softwares* de ampla utilização em nível mundial é o *Storm Water Management Model* (SWMM) (ROSSMAN, 2015). O SWMM é um *Software* de código aberto desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* dos Estados Unidos da América (EPA), o qual tem a capacidade de modelar processos hidrológicos e hidráulicos de chuva-vazão. Em síntese, o SWMM utiliza como modelo matemático para a propagação de vazão nos condutos as equações de Saint-Venant e utiliza uma abordagem de solução numérica baseada em discretização entre nós (*nodes*) e condutos (*links*) denominada EXTRAN (ROESNER et al., 1988; ROSSMAN, 2015).

Além disso, quando há a necessidade de uma análise mais refinada de certa singularidade em um sistema de drenagem, existem modelos ainda mais complexos,

mas de maior custo computacional. Um exemplo de modelo matemático que descreve o comportamento de um fluido, tridimensionalmente, dentro de um volume de controle são as equações de Navier-Stokes.

Diversos códigos realizam a solução numérica destas equações, as quais não possuem solução analítica. Dentre estes, destaca-se o OpenFOAM®. Por se tratar de um código livre e possuir uma ampla gama de bibliotecas, o OpenFOAM® vem ganhando grande popularidade no meio acadêmico. Como exemplo aplicado à drenagem urbana, Beg et al. (2016) e Lopes et al. (2015) realizaram comparações de dados obtidos experimentalmente com simulações realizadas no OpenFOAM® relativas a escoamentos em dispositivos específicos de drenagem.

Assim, engenheiros e cientistas possuem diversas estratégias para modelar e simular condições desejadas, desde modelos simples até complexos e mais custosos modelos tridimensionais. Dessa forma, enfatiza-se a importância de estudos realizados em modelos físicos experimentais para a validação dos mais diversos modelos computacionais.

## 2.2 COMPLICAÇÕES OCACIONADAS POR TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM REDES DE DRENAGEM PLUVIAL URBANAS

Durante eventos de chuvas intensas a ocorrência de um enchimento rápido de trechos da rede de drenagem pode ser manifestada (VASCONCELOS; WRIGHT, 2007; WRIGHT; VASCONCELOS; LEWIS, 2017). Enchimentos rápidos, por sua vez, podem acarretar na formação de transientes hidráulicos na rede, os quais resultam em fenômenos indesejados, como *geyserings* e retorno da água drenada à superfície de forma brusca através da superação da capacidade hidráulica dos condutos.

A transição de escoamentos em superfície livre para escoamentos pressurizados pode resultar em transientes de pressão consideráveis no escoamento. No momento em que esse transiente positivo de pressão encontra alguma singularidade, tal como um poço de visita ou um tubo de ventilação, o escoamento, por vezes, misto de água e ar, exerce uma grande pressão na parte inferior dos tampões de poços de visita, podendo ocasionar o lançamento vertical dos mesmos (LI; MCCORQUODALE, 1999).

Ocorrências de adversidades oriundas de transientes hidráulicos em redes de drenagem foram relatadas em periódicos científicos que abordam o tema (GUO; SONG, 1990; HAMAM; MCCORQUODALE, 1982; ZHOU; HICKS; STEFFLER, 2002). Dentre as complicações apresentadas, destaca-se colapsos de trechos da rede, lançamento vertical de tampas de poços de visita, emergência à superfície de águas servidas oriundas de sistemas de esgotamento mistos, entre outros.

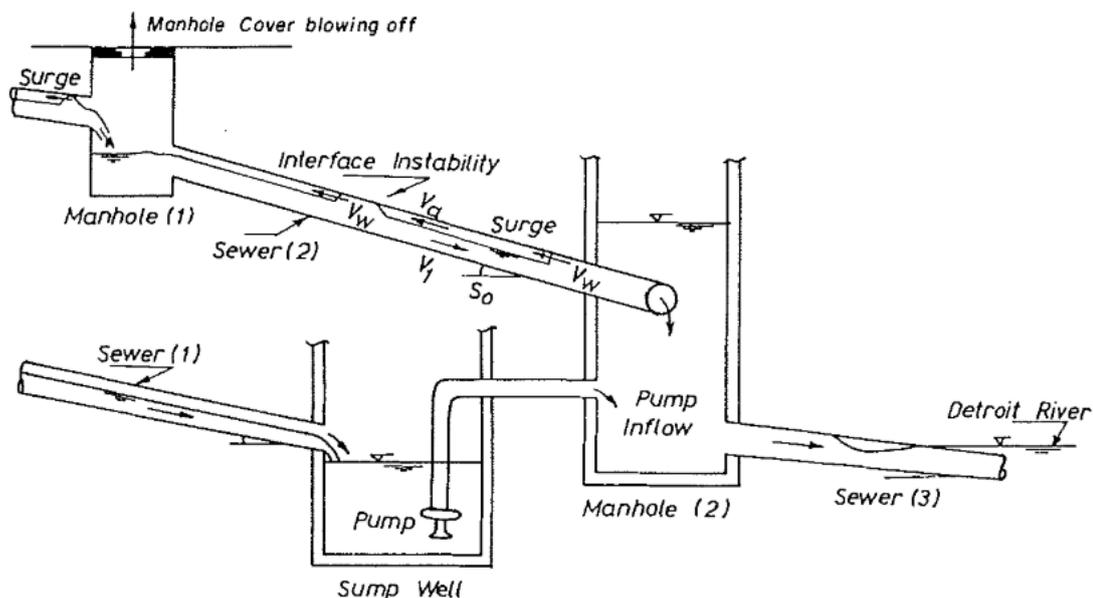
Nos subitens a seguir serão apresentados três casos relatados em bibliografia sobre este assunto.

### **2.2.1 Hamam e McCorquodale (1982)**

O caso do fenômeno do transiente de pressão ocorreu na cidade de Hamilton, na província de Ontário (Canadá). O trecho consistia em uma galeria celular com dimensões de 3 x 3 metros e na extremidade de jusante havia um vertedor. Durante eventos intensos o sistema apresentou valores de pressão elevados, ocasionando o arrancamento de uma tampa soldada de um poço de visita, resultando em um alagamento da região.

Também registrado no mesmo estudo, os autores relataram outra ocorrência na cidade de Amherstburg, também na província de Ontário. Neste caso o transiente foi registrado devido a descarga de uma bomba de esgoto em um outro trecho, causando uma onda de pressão, o que resultou no arrancamento da tampa de um poço de visita localizado há uma distância considerável da estação de bombeamento citada. O caso pode ser melhor elucidado conforme descrito pelos autores na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática do caso ocorrido em Hamilton (Canadá)

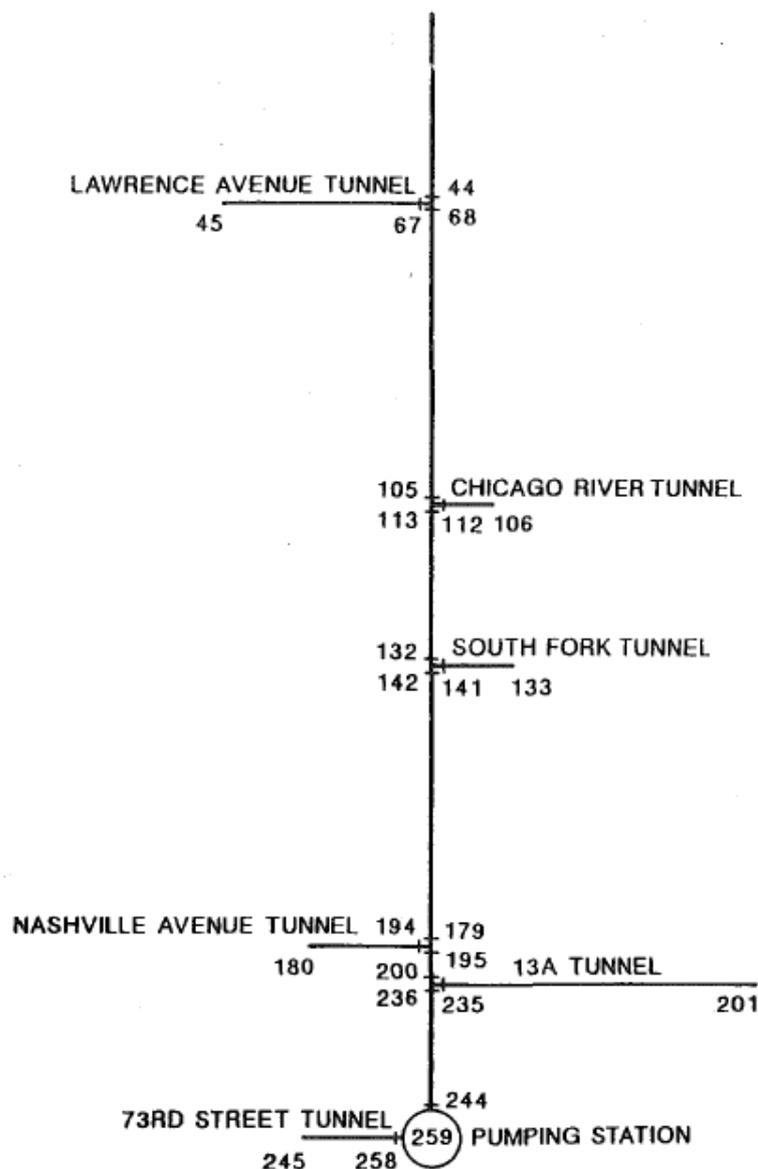


Fonte: (HAMAM; MCCORQUODALE, 1982).

### 2.2.2 Guo e Song (1990)

O evento de chuva que resultou no fenômeno mencionado neste trabalho ocorreu no dia 03 de outubro de 1986 na cidade de Chicago, Illinois (USA). Foram monitorados os dados de nível d'água na estação de bombeamento a jusante. Um croqui do trecho em análise do sistema *Tunnel and Reservoir Plant* (TARP) da cidade Chicago apresenta-se conforme a figura abaixo.

Figura 2 – Layout do sistema TARP da cidade de Chicago (USA)



Fonte: (GUO; SONG, 1990).

A localização e horário aproximados de ocorrência do fenômeno foram observadas. Medições indicaram que a galeria estava com sua seção 65% preenchida ao início da chegada do escoamento ao sistema, sendo que uma região à jusante já estava pressurizada, devido ao volume de água inicial já armazenado. À medida que a região pressurizada se expande para montante há a formação de uma onda, a qual atinge a região de montante 157 minutos após o início do evento.

A partir deste momento o transiente de pressão ocorre de montante para jusante, chegando na extremidade de jusante em um tempo de 175 minutos. Este transiente oscilatório continua ocorrendo no sistema, acarretando picos anômalos de

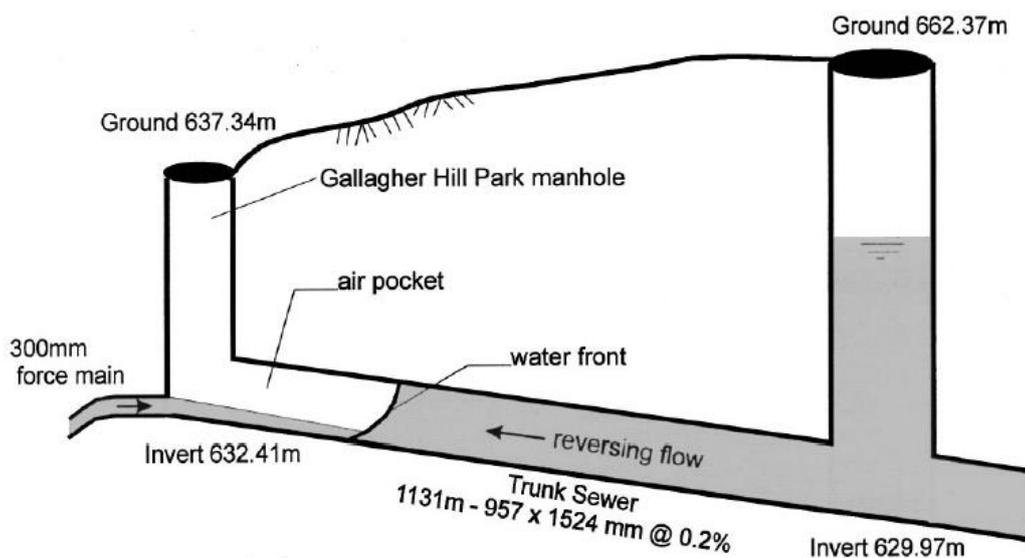
pressão, os quais resultaram em alagamentos e formação de *geysers* em poços de visita.

### 2.2.3 Zhou, Hicks e Steffler (2002)

O trabalho referido neste item aborda um fenômeno ocorrido no dia 04 de julho de 1995 na cidade de Edmonton, Alberta (USA). O evento de chuva que gerou o escoamento contribuinte para este evento se deu na magnitude de 90 mm em um período de 2 horas. Segundo os autores, o evento ultrapassou um tempo de recorrência de 300 anos na região. No que diz respeito às avarias ocorridas, destacou-se a explosão total de um poço de visita no parque Gallagher Hill, ponto turístico da cidade. Dentre as estruturas avariadas constavam-se: um conduto forçado de 300 milímetros de diâmetro, um tubo tronco de 1200 milímetros de diâmetro, uma tubulação de água de abastecimento de 600 milímetros de diâmetro e um trecho de gasoduto com 400 milímetros de diâmetro.

Para uma melhor elucidação do problema, uma representação esquemática foi elaborada conforme a Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática de um trecho da rede de drenagem da cidade de Edmonton, (USA)



Fonte: (ZHOU; HICKS; STEFFLER, 2002).

Em situações ordinárias o fluxo ocorreria da esquerda para a direita. Entretanto, devido ao afogamento de um poço de visita a jusante, ocorreu a manifestação de um transiente hidráulico no sentido contrário, conforme pode ser observado na Figura 3. A carga hidráulica, ocorrida no tubo tronco do sistema, foi na ordem de 12 a 15 metros.

## 2.3 EXPERIMENTOS FÍSICOS RELACIONADOS A TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM REDES DE DRENAGEM

Diversos pesquisadores buscaram, além da tentativa de descrever matematicamente o fenômeno de transientes hidráulicos em redes de drenagem, desenvolver modelos físicos reduzidos para um melhor entendimento do problema. Quase de forma unânime, os autores realizam a atividade experimental física a fim de comparar os dados obtidos com simulações computacionais. A partir deste exercício é possível validar a utilização de modelos matemáticos e numéricos.

Para um melhor entendimento sobre modelos físicos reduzidos relacionados a transientes hidráulicos em redes de drenagem, buscou-se na bibliografia trabalhos já publicados sobre o tema. Nos tópicos a seguir serão apresentados oito experimentos que abordam este conteúdo, indicando o problema proposto, variáveis de análise e representação dos dados coletados.

### 2.3.1 Trajkovic et al. (1999)

Realizado no Laboratório de Hidráulica da Universidade de Calabria (Itália), o aparato experimental consistiu em uma tubulação de acrílico transparente com 10 metros de comprimento, diâmetro interno de 10 centímetros e espessura das paredes de 5 milímetros. O sistema possuía declividades e vazões reguláveis e a aquisição de dados foi realizada através de oito piezômetros associados com transdutores de pressão distribuídos ao longo da linha, conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Experimento realizado por Trajkovic et al. (1999)

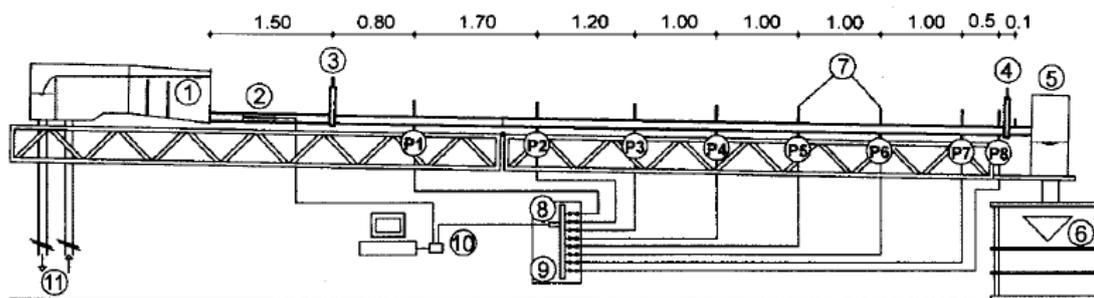


Figure 1. Schematic drawing of experimental set-up: 1) upstream tank; 2) flow meter; 3) upstream gate G1; 4) downstream gate G2; 5) downstream tank; 6) V-notch weir; 7) aeration pipes; 8) pressure transducer; 9) control panel; 10) acquisition data system; 11) inflow and outflow.

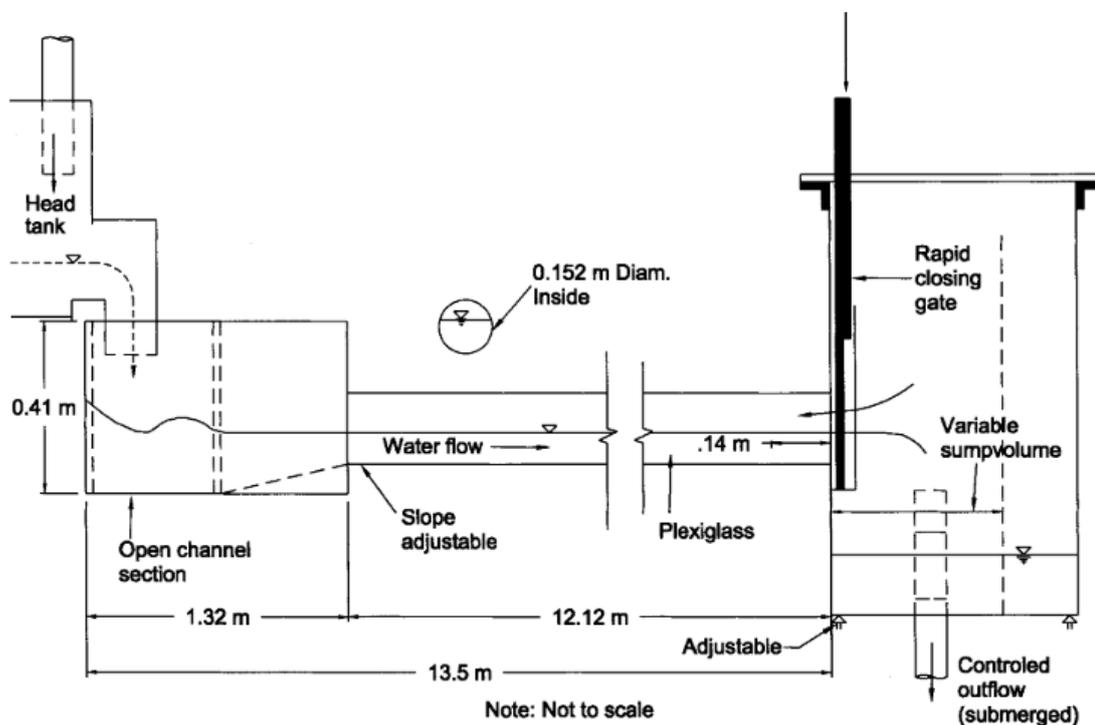
Fonte: (TRAJKOVIC et al., (1999).

Seis configurações de sistema foram testadas neste experimento, variando profundidades e vazões nas condições de contorno de jusante e montante do tubo, impondo condições de escoamento supercrítico, crítico e subcrítico no sistema.

### 2.3.2 Li e McCorquodale (1999)

No referido experimento, os autores utilizaram o experimento físico para a aquisição de dados que foram usados como calibragem para um modelo matemático proposto no mesmo trabalho. A tubulação utilizada no experimento foi de polímero acrílico com 152 milímetros de diâmetro e 12 metros de comprimento. A vazão no sistema era controlada através de um tanque de carga acoplado com uma válvula em sua saída. A aquisição de dados de pressão foi realizada através de nove piezômetros e dois transdutores utilizados para a medição do transiente.

Figura 5 – Experimento realizado por Li e McCorquodale (1999)



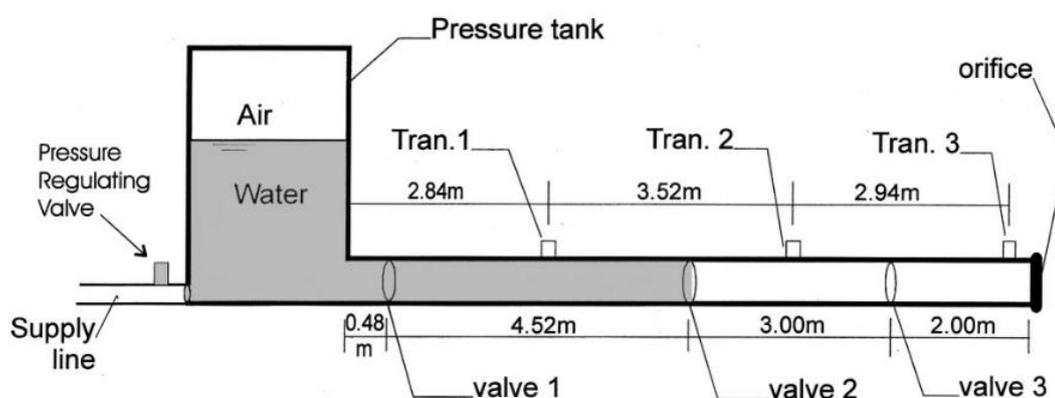
Fonte: (LI; MCCORQUODALE, 1999).

Dois tipos de simulações foram realizadas: uma a partir de um transiente gerado a partir do fechamento rápido da válvula localizada a jusante do tubo e outra a partir do afogamento do tanque de controle à jusante.

### 2.3.3 Zhou, Hicks e Steffler (2002)

As análises experimentais descritas no referido trabalho foram realizadas nas dependências do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Alberta (USA). Conforme a Figura 6, o aparato experimental é composto por um tanque de alimentação de aço galvanizado seguido por uma tubulação, também de aço galvanizado, de 10 metros de comprimento e 35 milímetros de diâmetro.

Figura 6 – Experimento realizado por Zhou, Hicks e Steffler (2002)



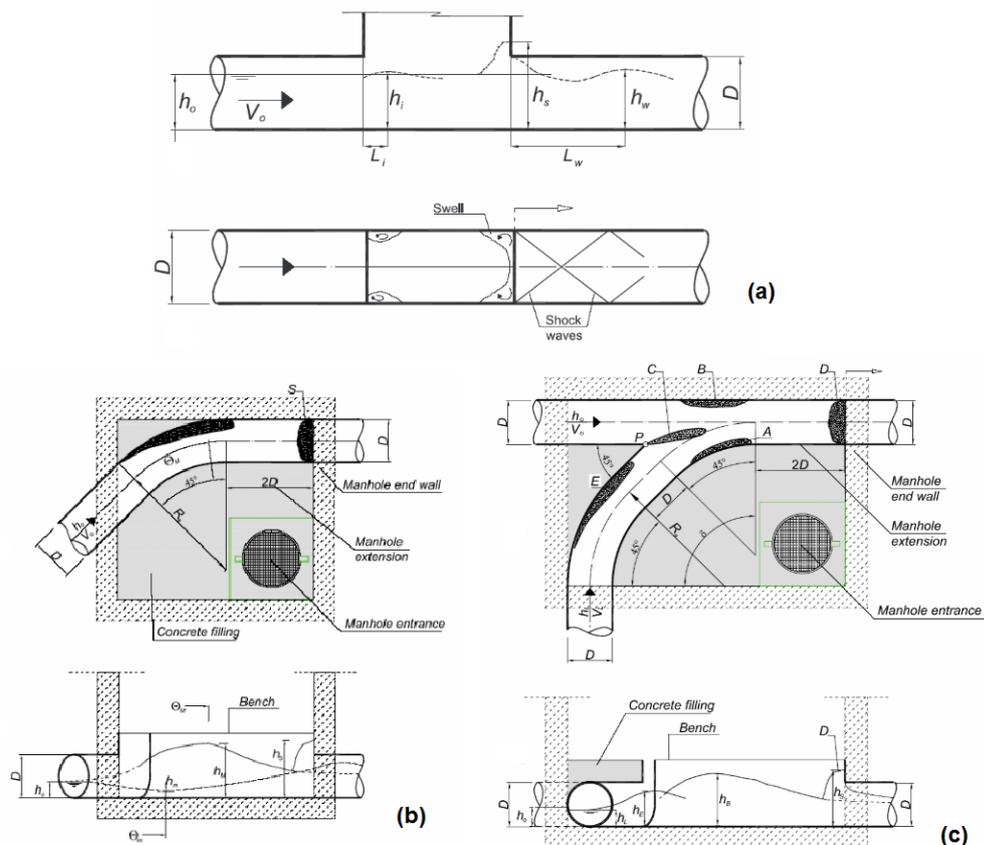
Fonte: (ZHOU; HICKS; STEFFLER, 2002)

Três registros de globo foram locados conforme a Figura 6 possibilitando a realização das condições experimentais desejadas. Para a aquisição dos dados de pressão, foram utilizados três transdutores de pressão de alta frequência. Com o auxílio dos registros, foram simuladas diferentes condições de enchimento rápido da tubulação.

#### 2.3.4 Hager e Gisonni (2005)

Diferente dos outros estudos abordados neste capítulo, o referido trabalho versa sobre aspectos mais práticos em relação ao dimensionamento de dispositivos de drenagem. São abordados neste trabalho os seguintes dispositivos: bueiros com passagem direta (Figura 7.a), bueiros com defleções (Figura 7.b) e bueiros com junção a 90° (Figura 7.c).

Figura 7 – Dispositivos ensaiados por Hager e Gisonni (2005)



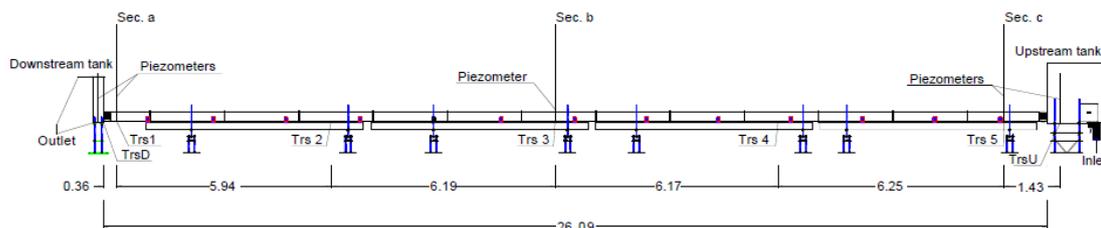
Fonte: (HAGER; GISONNI, 2005).

Neste estudo são apresentados problemas relacionados a estes dispositivos e são apresentadas diretrizes de projeto em relação a sua geometria. Além disso, os autores também abordam condições de escoamento, como distribuição de vazões e alturas da linha d'água, nestes dispositivos.

### 2.3.5 Ferreri, Freni e Tomaselli (2010). Ferreri, Ciruolo e Lo Re (2014)

Ambos estudos foram realizados por pesquisadores em comum e utilizou-se o mesmo aparato experimental para as corridas experimentais. O aparato consistiu em um tubo de acrílico de 26,09 metros de comprimento e 244 milímetros de diâmetro interno. A declividade do sistema aportava um ajuste de 0% a 3%. Foram coletadas séries de pressões a partir de sete transdutores especialmente espaçados conforme demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Aparato experimental utilizado por Ferreri, Freni e Tomaselli (2010) e Ferreri, Ciruolo e Lo Re (2014)



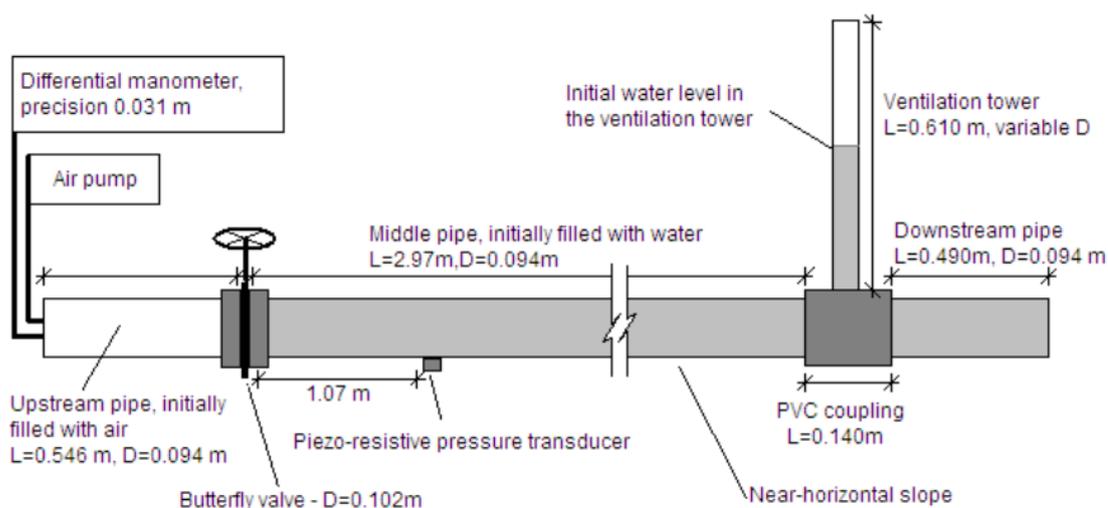
Fonte: (FERRERI; FRENI; TOMASELLI, 2010).

Em ambos trabalhos foram avaliadas situações com vazões variando de  $15 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $65 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$  e declividades da linha variando de 0% a 3%. O transiente hidráulico era formado a partir do fechamento rápido de uma válvula localizada na extremidade de jusante da tubulação.

### 2.3.6 Vasconcelos e Wright (2011)

Com o objetivo de investigar o fenômeno de *geysering* originado pela liberação abrupta de bolsões de ar em torres de ventilação, os autores desenvolveram um sistema experimental que permitia a pressurização do ar em um trecho a montante antes de sua liberação. O aparato pode ser melhor descrito a partir da Figura 9.

Figura 9 – Experimento realizado por Vasconcelos e Wright (2011)



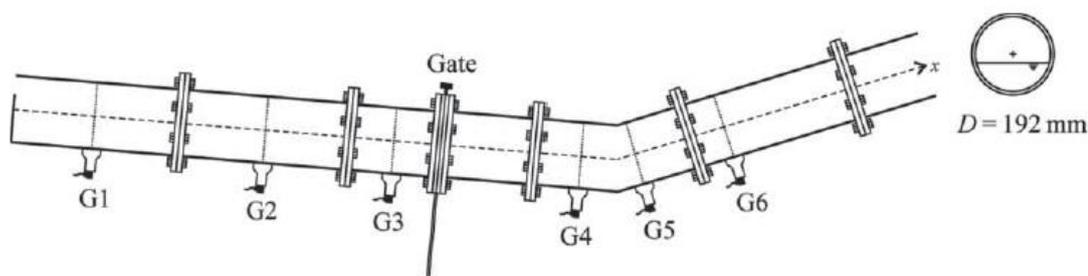
Fonte: (VASCONCELOS; WRIGHT, 2011).

Os dados de pressão no sistema foram obtidos através de um transdutor de pressão localizado 1,07 metros abaixo da válvula borboleta, conforme pode ser observado na figura acima. Na linha principal foram utilizadas tubulações de acrílico com 94 milímetros de diâmetro. Para a análise da movimentação dos bolsões de ar dentro da torre de ventilação foram posicionadas marcas de escala ao longo de seu comprimento e foram gravados vídeos em uma taxa de 30 frames por segundo.

### 2.3.7 Aureli et al. (2015)

O estudo foi realizado nas dependências do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Parma (Itália). O aparato experimental consistiu em um tubo de acrílico com 12,12 metros de comprimento, 192 milímetros de diâmetro interno e 4 milímetros de espessura. Neste estudo foram avaliadas as condições do escoamento frente a uma mudança de declividade, de 8,4% a -27,7%, a qual localizava-se a 7 metros da extremidade de jusante. A estrutura experimental pode ser melhor elucidada conforme a Figura 10.

Figura 10 – Experimento realizado por Aureli et al. (2015)



Fonte: (AURELI et al., 2015).

Foram coletados dados de pressão e velocidade através de técnicas não intrusivas em seis pontos do aparato. Os dados de pressão foram obtidos a partir piezômetros associados a transdutores de pressão e os dados de velocidade foram obtidos através de sensores ultrassônicos Doppler. Ambas coletas das séries de velocidades e pressões foram coletadas nos mesmos pontos.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 APARATO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1 Concepção geral do experimento

O experimento foi realizado nas dependências do Laboratório de Mecânica dos Flúidos e Hidráulica do Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente, pertencente ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rio Grande do Sul.

O experimento consiste em dois trechos ortogonais de uma rede de drenagem pluvial em escala reduzida, representadas por um tubo tronco principal e um trecho lateral que encontra o tubo tronco ortogonalmente em uma junção (PV). O tubo tronco possui uma continuação após o PV com descarga livre na extremidade de jusante. Além disso, na extremidade de jusante localiza-se uma válvula guilhotina, onde o fechamento rápido da mesma é o fator gerador do transiente hidráulico e pressurização subsequente do sistema.

Mais especificamente, dividiu-se o sistema de tubulação em três trechos: trecho principal (tubo tronco) a montante da junção (TPM), um trecho principal a jusante (TPJ) da junção e um trecho lateral a montante da junção (TLM), conforme pode ser observado na Figura 11 e na Figura 12.

Figura 11 – Localização e dimensões dos trechos, em metros

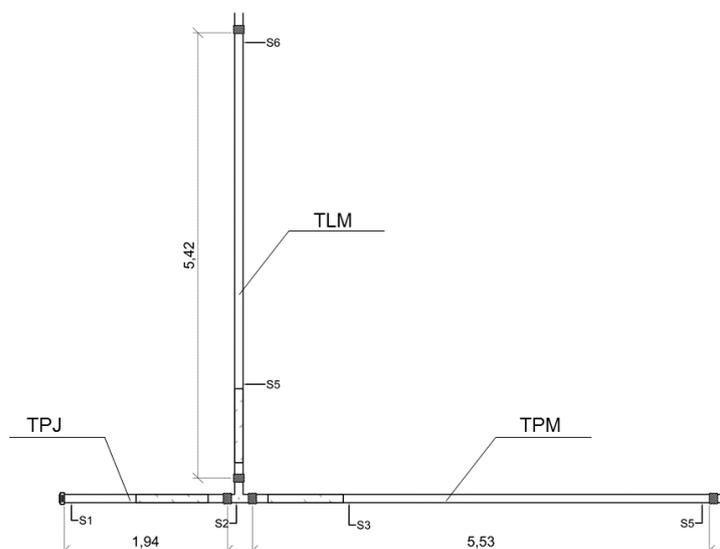
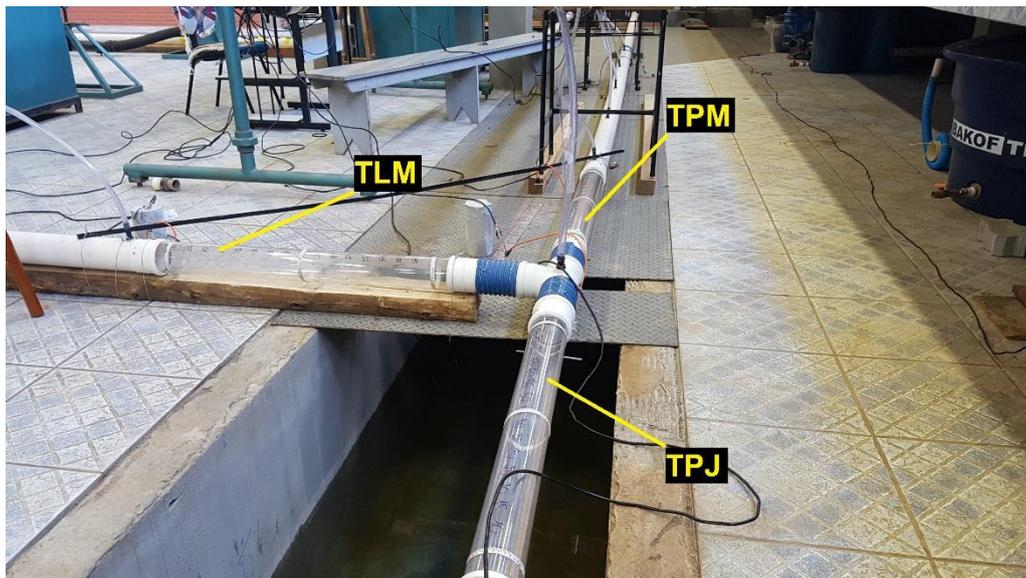


Figura 12 – Representação e nomenclatura dos trechos de ensaio.

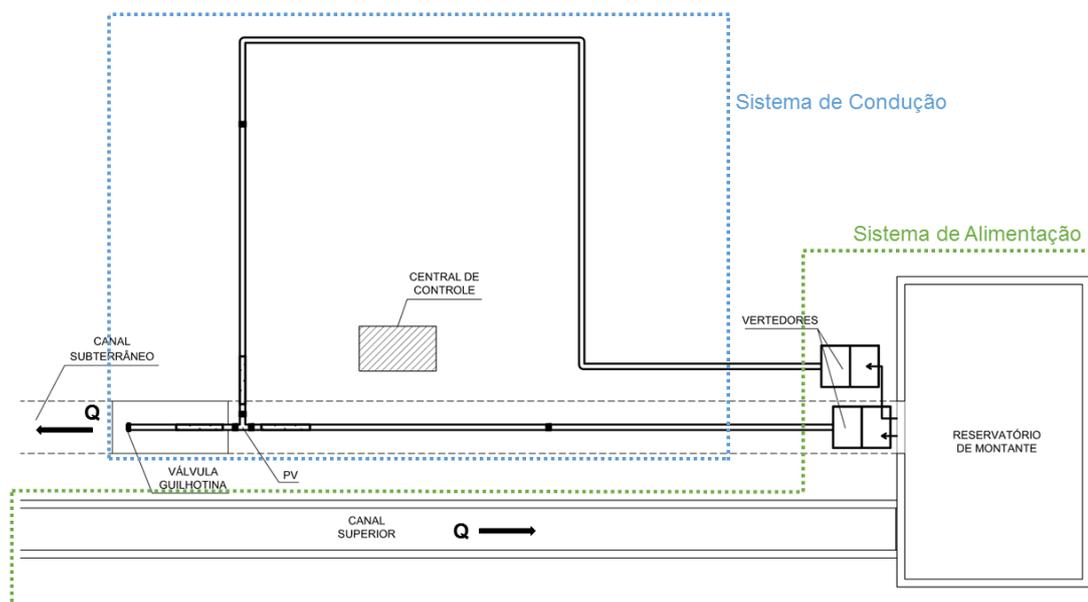


Fonte: Autor, 2019.

Cada um dos trechos a montante da junção possui alimentação e controle de declividades independentes, tornando possível a variação destes parâmetros em cada um dos trechos. Além disso, o trecho principal a jusante também tem a possibilidade de variação de declividade. O experimento possui um sistema de recirculação de água, tornando a alimentação contínua.

Pode-se dividir o aparato experimental em dois sistemas: sistema de alimentação e sistema de condução. É possível ter uma ideia do arranjo geral do experimento a partir da Figura 13.

Figura 13 – Layout experimental.



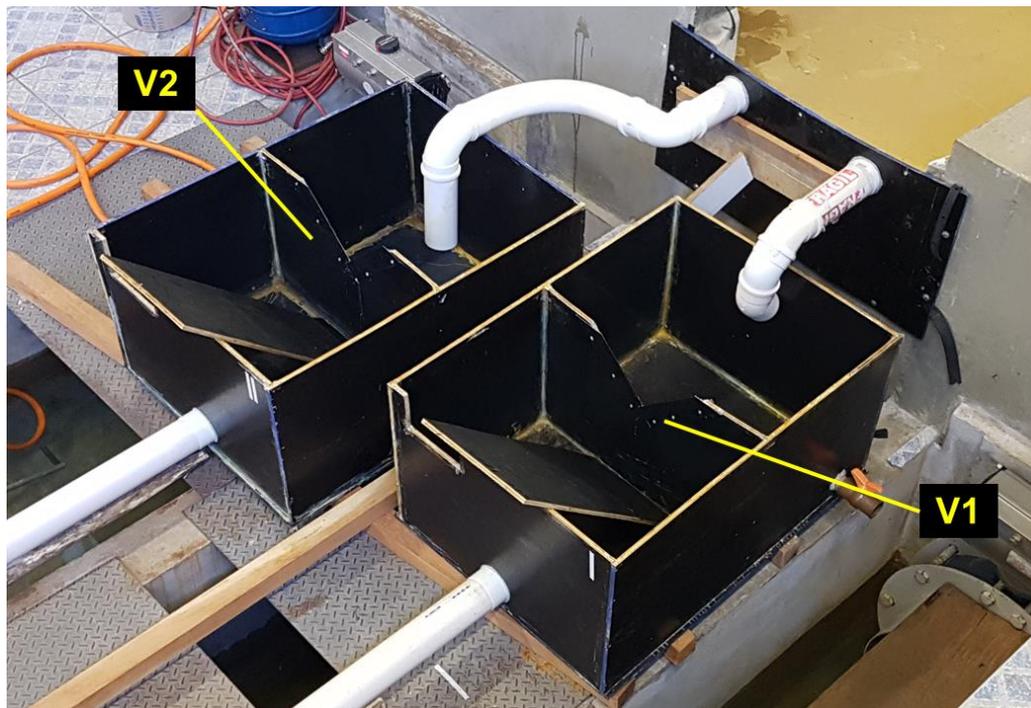
Fonte: Autor, 2019.

Assim, a água utilizada nas análises experimentais provém do sistema de alimentação, passando pelo sistema de condução, local onde ocorre o transiente hidráulico e onde foram feitas as coletas de dados. Logo, retornará ao sistema de alimentação, a jusante, de onde voltará para a recirculação do sistema. Os componentes de cada um desses sistemas serão abordados de maneira mais detalhada conforme os subitens a seguir.

### 3.1.2 Sistema de Alimentação

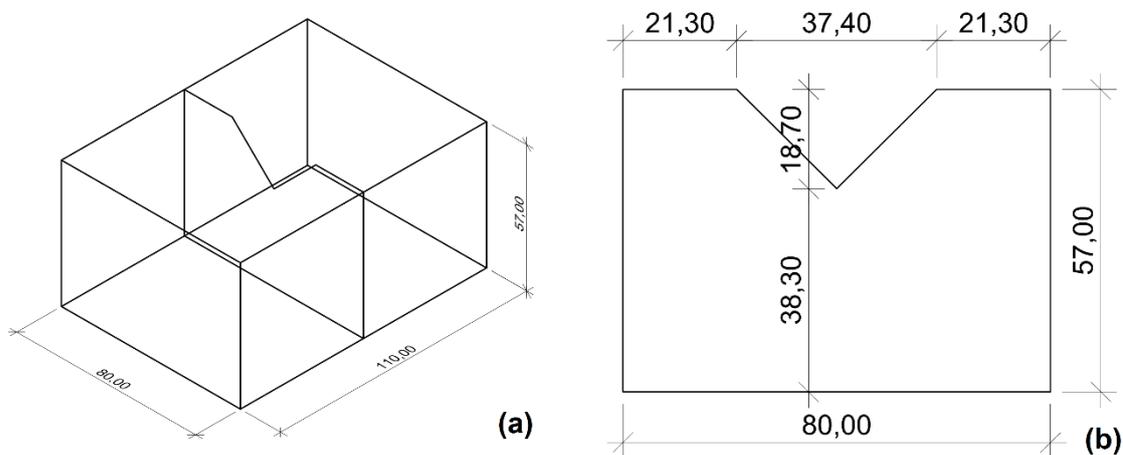
O controle da vazão de entrada no sistema é realizado por dois vertedores de controle de vazão, sendo um para cada um dos trechos a montante, ou seja, o Vertedor 1 (V1), que alimenta o TPM e o Vertedor 2 (V2), que alimenta o TLM. Cada um dos vertedores está contido em uma caixa bipartida, sendo o vertedor posicionado na bipartição. Foram adotadas recomendações de dimensões das contrações laterais e de distância do vértice do vertedor ao fundo conforme descrito por Porto (2006). Estes detalhes são melhor observados conforme a Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 – Vertedores de alimentação.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 15 – Detalhes e dimensões do vertedor V1, em centímetros.



Fonte: Autor, 2019.

Assim, a água vinda do reservatório entra na partição de montante, enchendo parcialmente a caixa e escoando pelo vertedor para a caixa de jusante, a qual é interligada com o início do sistema de condução. O vertedor possui formato triangular com vértice de  $90^\circ$  graus, angulação amplamente utilizada e com diversas equações empíricas para medição de vazão associadas a ela. A interface do vertedor é

constituída por uma chapa delgada metálica, o que o caracteriza como um vertedor de parede fina.

Segundo Porto (2006), esse tipo de vertedor é utilizado para medição de pequenas vazões, caso ocorrido no presente estudo. A partir de equação da energia e desprezando a carga cinética de aproximação é possível obter a expressão geral para medição de vazão em vertedores triangulares.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \operatorname{tg}(\alpha/2) h^{5/2} \quad (3)$$

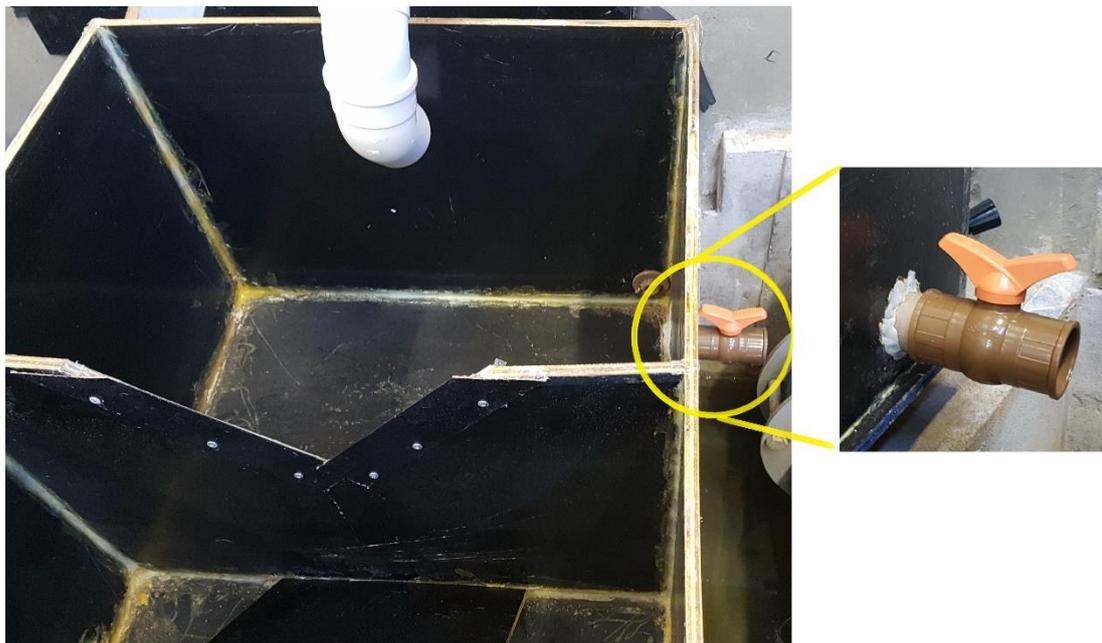
Onde  $C_d$  é o coeficiente de descarga,  $g$  a aceleração da gravidade,  $\alpha$  o ângulo de abertura do vertedor e  $h$  a carga hidráulica sobre a crista do vertedor.

Entretanto, pela praticidade da utilização de vertedores triangulares de parede fina, Thomson (1858, apud PORTO, 2006, p. 389) desenvolveu uma equação empírica para a determinação de vazão apenas em função da altura da lâmina d'água sobre a crista do vertedor, a qual foi utilizada para a verificação de entrada de vazão no sistema a partir da leitura de uma régua posicionada na lateral dos vertedor.

$$Q = 1,4 h^{5/2} \quad (4)$$

Para o controle das vazões de entrada do sistema, instalou-se um registro globo de diâmetro nominal de 50 mm em uma parede lateral da partição de montante de ambas as caixas que contém os vertedores, conforme a Figura 16. A partir da manobra destes registros e da descarga de água no canal que causa um *bypass* no sistema é possível realizar o controle de vazões, sendo que é admitida uma variação de vazões de 0 L/s a 1,45 L/s no vertedor relativo ao trecho lateral do sistema e uma variação de 0 L/s a 1,63 L/s no vertedor relativo ao trecho principal de montante.

Figura 16 – Sistema de controle de vazões



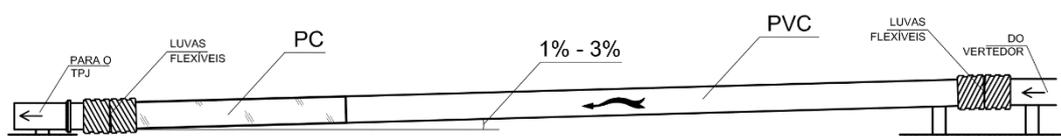
Fonte: Autor, 2019.

No presente experimento foram ensaiadas 3 configurações de vazão para cada um dos trechos a montante: completa, reduzida e zero, totalizando um total de 8 combinações de vazão (exclui-se vazões nulas em ambos os trechos). As corridas experimentais serão melhor detalhadas conforme o item 3.2.2. do presente trabalho.

### 3.1.3 Sistema de Condução

Conforme citado anteriormente no item 3.1.1. deste estudo, pode-se dividir o sistema de condução em três trechos, sendo eles: trecho principal a montante (TPM), trecho principal a jusante (TPJ) e trecho lateral a montante (TLM). Entretanto, no presente trabalho, considerar-se-á a análise apenas de setores específicos dos trechos, onde há a importância da análise do transiente hidráulico (Figura 11). Estes setores possuem declividade ajustável, variável de análise no presente trabalho, de forma independente, conforme observado na Figura 17.

Figura 17 – Vista lateral das tubulações de montante. Escala não representativa



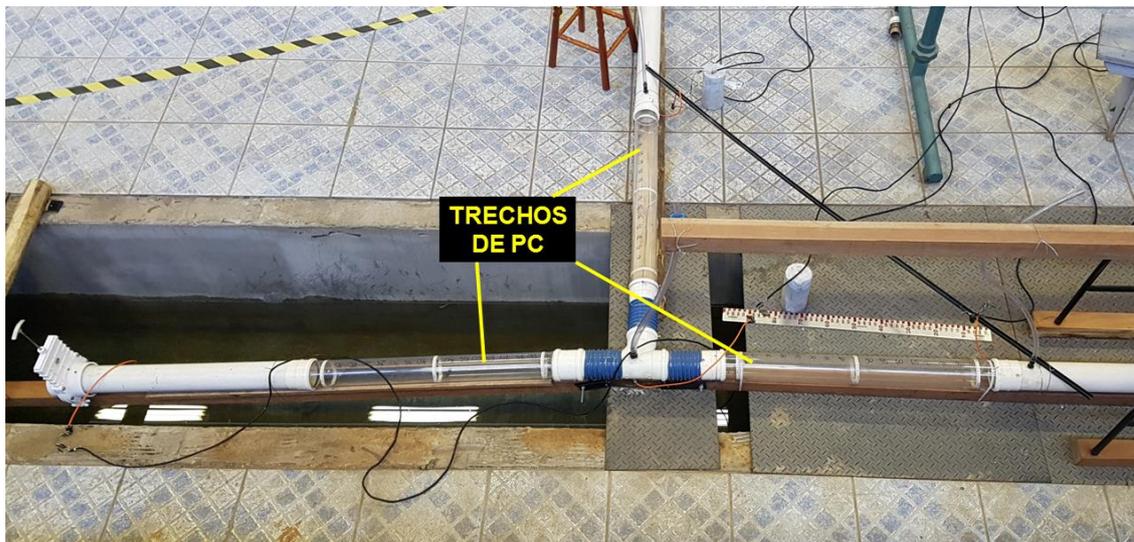
Fonte: Autor, 2019.

Foram avaliadas declividades de 1%, 2% e 3% em ambos trechos a montante e fixou-se uma declividade de 4% no trecho a jusante com o intuito de evitar o afogamento do mesmo, o que resultaria a propagação de um transiente para montante, dificultando as análises desejadas. A combinação das variações de declividade, somadas as variações de vazão, foram organizadas conforme o item 3.2.1. do presente estudo.

Deve-se considerar que a declividade é um parâmetro de extrema sensibilidade, sendo o seu controle de grande importância. Para garantir declividades constantes ao longo da linha utilizou-se caibros rígidos de madeira, os quais possuem deformações desprezáveis se submetidos ao carregamento das tubulações sobre eles, mesmo que totalmente ocupadas por água.

Quanto aos materiais, foram utilizados dois tipos de tubulação: Policloreto de Vinila (PVC) e Policarbonato Transparente (PC). Utilizou-se tubos de PC em trechos de interesse de análise visual do transiente hidráulico, ou seja, nas entradas e na saída da junção PV, conforme pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Localização dos trechos de tubulação de PC



Fonte: Autor, 2019.

Os tubos de PC possuem 1 m de comprimento, 95 mm de diâmetro interno e 100 mm de diâmetro externo. Já nos outros trechos foram utilizadas tubulações de PVC, série normal (SN), com DN 100 mm, ou seja, 98 mm de diâmetro interno e 101,6 mm de diâmetro externo.

Como dimensões longitudinais pode-se definir o comprimento de cada um dos trechos: o TPM com 5,53 m de comprimento, medidos entre os eixos das luvas; o TLM com 5,42 metros de comprimento, com o mesmo critério de medição; e o TPJ com 1,94 m de comprimento, medidos entre a luva e a válvula guilhotina (Figura 11). As dimensões das outras tubulações também foram averiguadas. Entretanto, as mesmas não são de interesse do presente trabalho.

Além disso, ressalta-se que foram instalados tubos de ventilação de 0,5 polegadas de diâmetro nos trechos de montante após o fim dos trechos em PC. Os tubos de ventilação foram espaçados a cada 1 m com o intuito de evitar o aprisionamento de ar nos trechos de montante, o que dificultaria a leitura dos dados de pressão.

### 3.1.4 Conectores e válvulas

De maneira geral, em vértices que não foram submetidos a mudanças de declividade, foram utilizadas junções de PVC, SN, para tubos com DN 100 mm.

Entretanto, nas regiões que foram submetidas a variações de declividade utilizou-se mangueiras flexíveis de silicone de 100 mm, as quais foram fixadas e vedadas nos trechos que foram unidos.

Na junção de encontro das tubulações (PV) foi utilizado um tê em PVC, SN, com entradas e saída para tubos de DN 100. No topo desta peça foi instalada uma mangueira transparente de diâmetro de 1 polegada, que operou como piezômetro, com o intuito de avaliar as cargas hidráulicas após a pressurização do sistema, comparando com os resultados medidos pelos sensores de pressão. Além disso, por essa mangueira foi possível visualizar possíveis “geysers” em condições experimentais mais abruptas.

Dentre as peças utilizadas destaca-se, por sua importância no experimento, a válvula guilhotina localizada na extremidade inferior do TPJ. A válvula, conforme observado no detalhe da Figura 19, possui um sistema rápido de acionamento. Similar a um registro de gaveta, a válvula guilhotina possui uma lâmina de fechamento perpendicular ao fluxo. Entretanto, o acionamento da mesma é dado pelo pressionamento de um dispositivo de fechamento, que resulta em um tempo de fechamento menor que 1 segundo. Esse fato é de suma importância, pois a proposta de geração do transiente hidráulico no presente trabalho é dada a partir da interrupção brusca do escoamento.

Figura 19 – Válvula guilhotina



Fonte: Autor, 2019.

## 3.2 COLETA DE DADOS

### 3.2.1 Organização das Corridas Experimentais

Conforme mencionado nos itens 3.1.2. e 3.1.3. do presente trabalho foram realizadas três variações de declividade e três variações de vazões, excluindo as vazões nulas do sistema, para os trechos TPM e TLM. Assim, totalizou-se 72 configurações experimentais. Foram realizadas coletas em triplicata para cada configuração, totalizando 216 corridas experimentais. É possível visualizar esta organização, de maneira mais detalhada, a partir do Apêndice 1, o qual representa a planilha de organização utilizada durante a realização do experimento.

As variáveis experimentais utilizadas foram vazões e declividades em ambos os trechos TPM e TLM, conforme a Tabela 2.

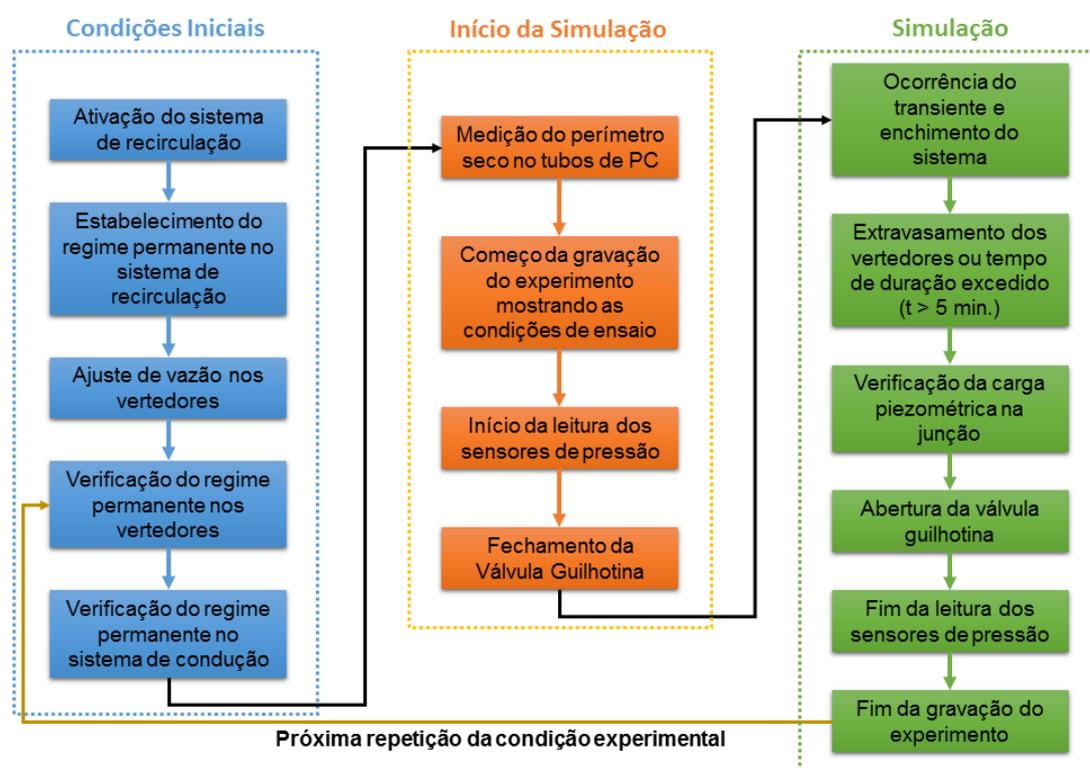
Tabela 2 – Variáveis experimentais e valores utilizados

Variável Experimental	Valores Considerados
Vazão no TPM – $Q_P$ (L/s)	1,63 0,37 0,00
Vazão no TPM normalizada – $Q_P^* = Q_P / \sqrt{g D^5}$	0,173 0,039 0,000
Vazão no TLM – $Q_L$ (L/s)	1,45 0,37 0,00
Vazão no TPM normalizada – $Q_L^* = Q_L / \sqrt{g D^5}$	0,154 0,039 0,000
Declividade no TPM – $S_P$ (%)	1 2 3
Declividade no TPM – $S_L$ (%)	1 2 3

Fonte: Autor, 2019.

Ademais, o procedimento de coleta de dados foi realizado conforme o protocolo presente no Apêndice 2 e pode ser representada conforme o fluxograma presente na Figura 20. Esquemáticamente, pode-se dividir cada corrida experimental em 3 fases: Condições Iniciais, onde se estabelece as condições plenas de cada corrida experimental; Início da Simulação, onde se realizam as medições dos parâmetros antes da ocorrência do transiente hidráulico; Simulação, onde se decorre o transiente hidráulico, até o término da corrida em questão.

Figura 20 – Fluxograma relativo às corridas experimentais.



Fonte: Autor, 2019.

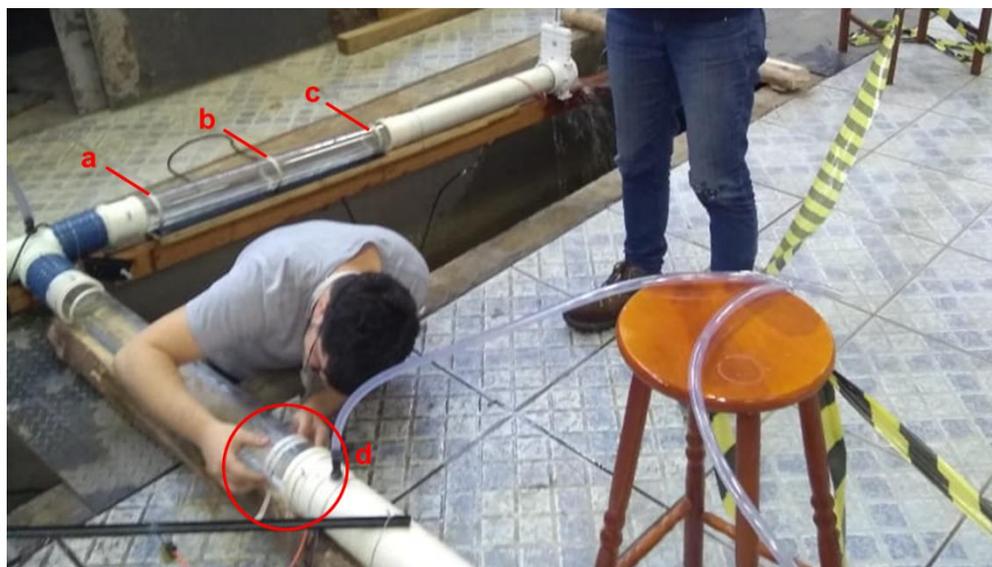
Para cada corrida experimental preencheu-se um formulário de coleta, documento que se encontra no Apêndice 3. Além de dados quantitativos do experimento, o formulário possui um campo para as anotações de observações, permitindo uma análise qualitativa. Após o término das corridas experimentais todos os formulários foram compilados em um volume único.

### 3.2.2 Dados de Vazão e Altura da Profundidade do Escoamento Antes do Regime Transiente

Conforme apresentado na Tabela 2, para cada trecho foram ensaiadas três magnitudes de vazão, sendo elas: vazões inteiras (1,63 L/s e 1,45 L/s, para o TPM e TLM, respectivamente), vazões reduzidas (0,37 L/s para ambos os trechos) e vazões nulas (0,00 L/s). Também como abordado no item acima, cada vazão é função da carga hidráulica sobre a crista do vertedor.

Além disso, avaliou-se a lâmina de água na tubulação em diferentes pontos do sistema no regime permanente de escoamento, ou seja, antes do acionamento da válvula guilhotina. Essa avaliação foi realizada em cada um dos tubos de PC (TPM, TLM e TPJ) transparente em três seções equidistantes, sendo elas: jusante, média e montante, conforme o sentido do escoamento, totalizando nove pontos de medição. A Figura 21 exemplifica o processo de medição realizado.

Figura 21 – Seções de medição do perímetro seco: Montante (a), Médio (b) e Jusante (c). Método de medição em (d)



Essa avaliação foi realizada através da medição de perímetro seco – ou perímetro não molhado – de cada seção. Partindo de relações geométricas da seção, pode-se calcular a altura da água dentro do conduto através da equação abaixo.

$$y = \frac{D_i}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{P_s}{D_e}\right) \right] \quad (5)$$

Onde  $D_i$  é o diâmetro interno da tubulação,  $D_e$  é o diâmetro externo da tubulação e  $P_s$  é o perímetro seco, dado que foi coletado no experimento.

Dessa forma, elaborou-se uma tabela contendo a altura do escoamento nas 9 seções para cada uma das 216 corridas experimentais. Através destes dados de altura, somados a cota geométrica obtido através da declividade ensaiada, é possível calcular a cota piezométrica para cada situação.

Além disso, a partir dos dados de vazão e profundidade do escoamento pode-se calcular o Número de Froude para cada uma das seções medidas. O Número de Froude pode ser representado por:

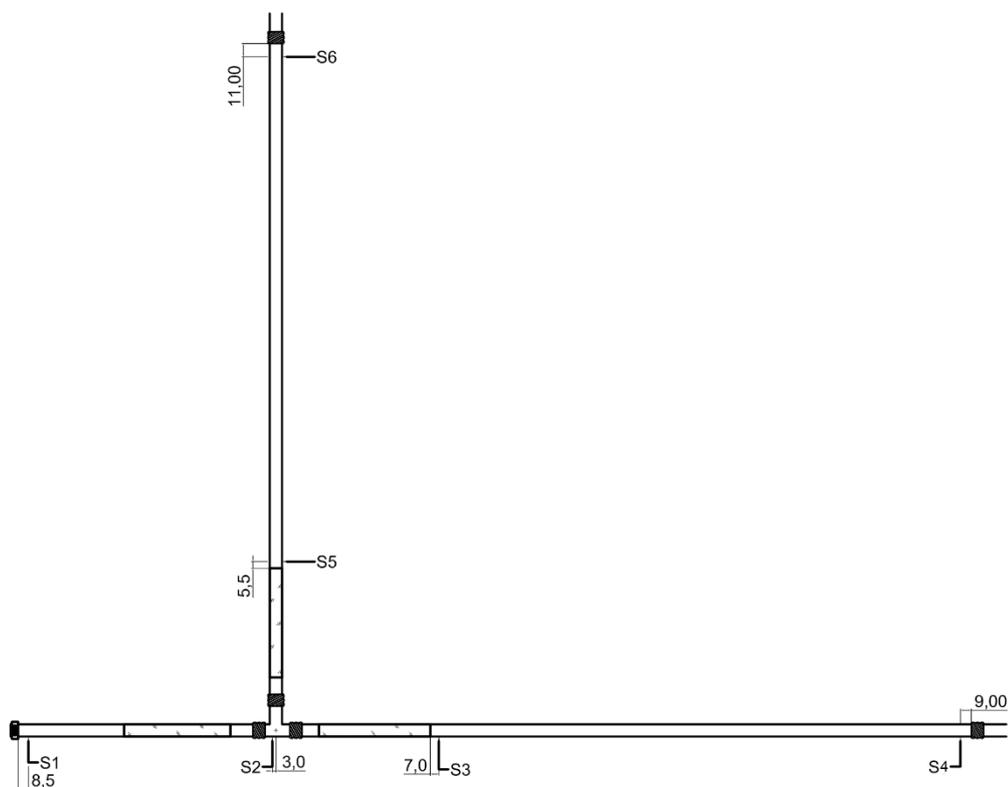
$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g h_m}} \quad (6)$$

Onde  $U$  é a velocidade do escoamento,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h_m$  é a altura média do escoamento, que em seções circulares é representada pelo quociente entre a área molhada e o tirante de escoamento.

### 3.2.3 Série de Pressões

Em concordância aos trabalhos apresentados na fundamentação teórica, a avaliação de séries de pressões é de fundamental importância para o entendimento do fenômeno hidráulico em análise. Assim, foram avaliadas as séries de pressões em 6 pontos distintos do sistema experimental, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Localização dos sensores de pressão relativo a pontos chave do aparato experimental. Dimensões em centímetros.

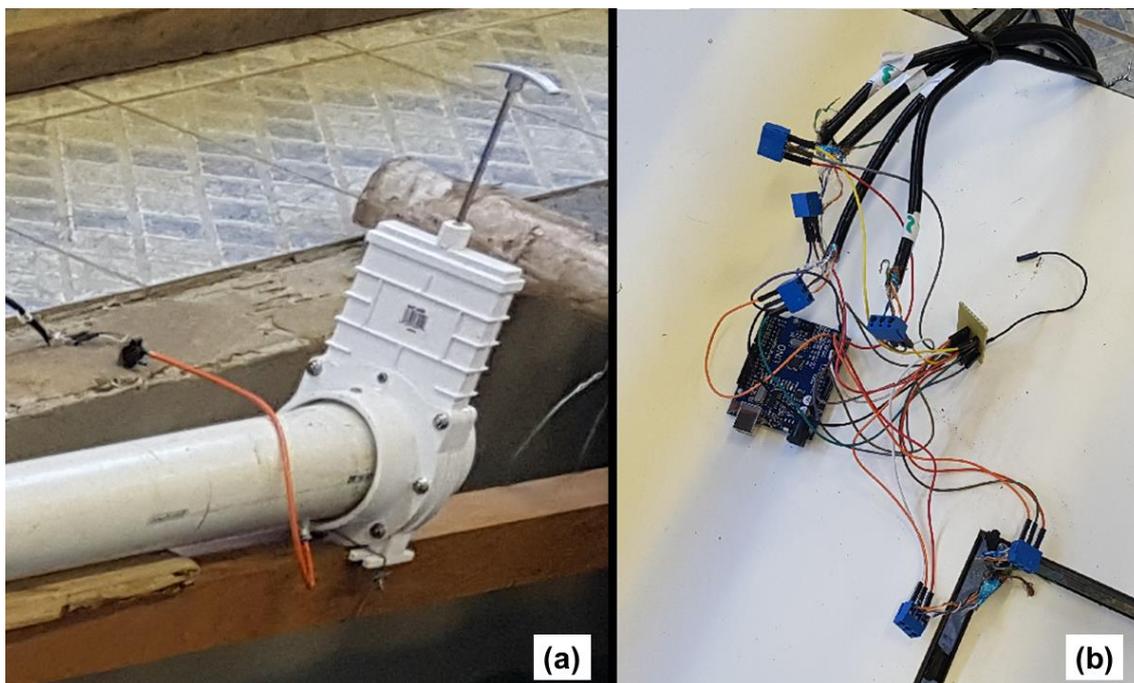


Fonte: Autor, 2019.

Foram utilizados sensores de baixo custo implementados na plataforma de prototipagem Arduino ([www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)). O desenvolvimento destes sensores faz parte de um projeto de pesquisa paralelo realizado no *Grupo de Pesquisas em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias*, grupo que integra este trabalho. A utilização de sensores de baixo custo vem ganhando grande popularidade, visto que sensores comerciais são de elevado valor econômico.

Foram utilizados sensores de pressão piezoresistivos MPX5010dp acoplados em uma placa microcontroladora Arduino rev. 3, o que permitiu o armazenamento de dados de forma direta em um computador pessoal através do software *Microsoft Excel*. Utilizou-se uma frequência de aquisição de dados de 10 Hz (intervalos de 0,1 segundos). Na Figura 23 detalha-se os sensores utilizados.

Figura 23 – Em (a), fixação dos sensores nas tubulações e em (b), detalhe da placa Arduino.



Fonte: Autor, 2019.

Além disso, ressalta-se que a saída de dados adquirida pela planilha de aquisição é referente a tensão medida pelos sensores. Assim, aplicou-se um fator de conversão nos resultados, convertendo tensão em centímetros de coluna de água através da relação:

$$h = \frac{100}{1023} V \quad (7)$$

Onde  $h$  é a pressão em centímetros de coluna de água e  $V$  é a tensão em Volts.

Posterior a esta conversão, os dados ainda foram convertidos em carga piezométrica. Adotando o ponto de instalação do Sensor 1 como *datum* (referencial zero) e tendo averiguadas as alturas dos outros sensores em relação a este marco para cada declividade ensaiada, pode-se representar os dados adquiridos em termos de carga piezométrica através da equação abaixo.

$$H = h + Z \quad (8)$$

Onde  $H$  é a carga piezométrica em centímetros,  $h$  é a pressão medida pelos sensores em centímetros e  $Z$  é a cota geométrica de cada sensor em relação ao *datum*.

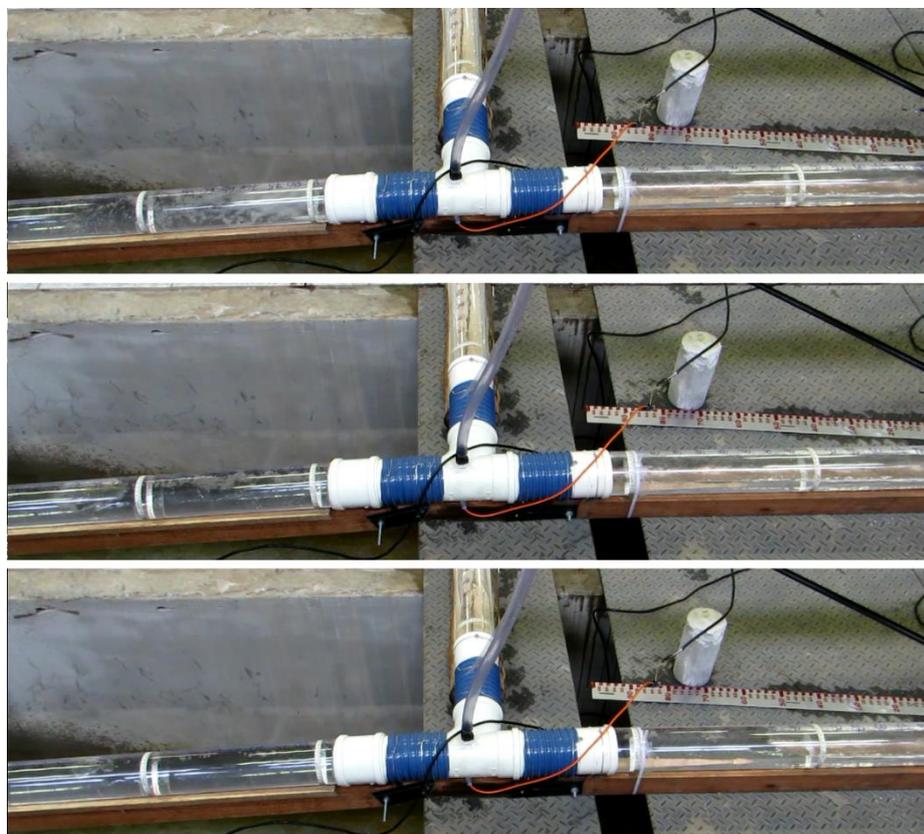
### 3.2.4 Avaliação Visual

Realizaram-se tomadas audiovisuais de cada corrida experimental, conforme descrito no protocolo de coleta. Através das gravações nos trechos de PC transparente é possível ver a propagação do transiente hidráulico, além de visualizar a movimentação de bolsões de ar dentro da tubulação. Ademais, foram posicionadas marcas de escala nas tubulações de PC transparente, o que permite avaliar as velocidades dos bolsões de ar.

As tomadas foram capturadas com uma câmera digital modelo Canon PowerShot SX50 HS a uma taxa de 23 quadros por segundo e com dimensões de quadro de 1920 x 1080. Os tempos de gravação foram variados, conforme a necessidade da corrida experimental, sendo as corridas de menores vazões mais longas. Totalizou-se aproximadamente 183 GB de material os quais estão em posse do *Grupo de Pesquisas em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias*.

Através da Figura 24 pode se ter uma ideia do modelo de gravação utilizado.

Figura 24 – Representação do modelo de avaliação visual.



### 3.3 ANÁLISE DE ERROS

Toda medição experimental possui um erro associado a ela e para um bom detalhamento dos resultados obtidos em um experimento a avaliação deste erro experimental é de suma importância. Assim, diversas categorias de erro podem ser elegidas, tais como: erros humanos; erros experimentais; erros sistemáticos e erros aleatórios. Portanto, busca-se na execução de experimentos a minimização desses erros, resultando em resultados mais acurados e com o grau de precisão requerido (VASCONCELOS, 2007).

À vista disso, pode-se expressar uma medida experimental através de um termo composto de duas parcelas:

$$X = \bar{x} \pm \Delta x \quad (9)$$

Onde  $\bar{x}$  representa o valor médio da medição e  $\Delta x$  o erro associado a esta medição.

Além disso, determinadas grandezas experimentais podem ser representadas como uma função de uma ou mais variáveis e a análise do seu erro deve ser realizada via expansão em séries de Taylor. Tomando uma grandeza  $q$  representada por medições  $m, n, \dots$  e seus respectivos erros experimentais  $\Delta m, \Delta n, \dots$ , segundo Handscomb (2004, apud Vasconcelos, 2007), o erro associado à grandeza  $q$  ( $\Delta q$ ) pode ser representado por:

$$\Delta q (m, n, \dots) = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial n} \Delta n\right)^2 + \dots} \quad (10)$$

Assim, a grandeza  $q$  é representada por:

$$q = \bar{q} \pm \Delta q \quad (11)$$

No presente estudo foram avaliadas quatro grandezas experimentais principais, sendo elas: séries de pressões medidas pelos sensores; vazões de entrada no sistema nos vertedores V1 e V2; declividade dos trechos TPM e TLM; profundidade do escoamento nos trechos TPM, TLM e TPJ em regiões próximas à junção. Nas linhas abaixo serão apresentados a descrição dos erros experimentais associados a essas variáveis

– *Séries de Pressões:*

Conforme abordado no item 3.2.3, os dados de séries de pressões foram obtidos a partir de medições realizadas com sensores piezoresistivos. Os erros associados a essas medições são disponibilizados pelo próprio fabricante dos sensores e possuem magnitude de  $\pm 5\%$ .

– *Vazões de Entrada:*

Exposto no item 3.1.2, a magnitude das vazões foi calculada pela Equação 6. Considerou-se um erro de leitura na régua posicionada junto aos vertedores na ordem de 1 mm ( $\Delta h = 1$  mm). Assim, o erro deste parâmetro pode ser representado por:

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = 3,5 h^{3/2} \rightarrow \Delta Q = \sqrt{(3,5 h^{3/2} \Delta h)^2} \quad \therefore \Delta Q = 0,0035 h^{3/2}$$

Portanto, a vazão de entrada no sistema pode ser representada por:

$$Q = 1,4 h^{5/2} \pm 0,0035 h^{3/2}$$

Assim, o limite de erros de vazão pode ser representado conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Limites para erros no cálculo de vazões

Vazão de Referência (L/s)	Limite Inferior (L/s)	Limite Superior (L/s)	Erro Relativo (%)
1,63	1,57	1,69	$\pm 3,73$
1,45	1,39	1,51	$\pm 3,91$
0,37	0,34	0,39	$\pm 6,76$

Fonte: Autor, 2019.

– *Declividade dos trechos TPM e TLM*

De forma análoga ao item anterior e adotando um erro de 1 mm ( $\Delta h = 1$  mm) no ajuste de elevação da extremidade de montante dos trechos TPM e TLM, obtém-se:

$$\frac{\partial i}{\partial H} = \frac{100}{L} \rightarrow \Delta i = \frac{100 \Delta H}{L}$$

Então, pode-se escrever a declividade dos trechos, em forma percentual, como:

$$i = \frac{100 H}{L} \pm \frac{0,1}{L}$$

– *Profundidade do escoamento:*

A profundidade do escoamento é função do perímetro seco medido através das tubulações de PC, conforme indicado pela Equação 7. Assim, também de forma análoga aos cálculos de erros anteriores, chega-se a relação:

$$\frac{\partial y}{\partial P_S} = -\frac{D_i}{2 D_e} \operatorname{sen}\left(\frac{P_S}{D_e}\right) \rightarrow \Delta y = \frac{D_i}{2 D_e} \operatorname{sen}\left(\frac{P_S}{D_e}\right) \Delta P_S$$

Adotando um erro de medição do perímetro seco na ordem de 1 mm, obtêm-se a seguinte relação para a estimativa da profundidade do escoamento.

$$y = \frac{D_i}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{P_S}{D_e}\right) \right] \pm \frac{D_i}{2000 D_e} \operatorname{sen}\left(\frac{P_S}{D_e}\right)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INDEXAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DE DADOS

Foram ensaiadas 72 condições experimentais, sendo que cada uma delas foi realizada em triplicata. Assim, para uma melhor organização, indexou-se cada condição experimental por um número em ordem crescente, conforme a ordem de realização das corridas experimentais. A partir dessa organização nomeou-se cada arquivo de vídeo e cada planilha contendo as séries de pressões, além de ordenar a planilha de cálculo das profundidades de escoamento.

Tabela 4 – Indexação das corridas experimentais

Índice	Q <sup>*</sup> P	Q <sup>*</sup> L	S <sub>P</sub> (%)	S <sub>L</sub> (%)	Índice	Q <sup>*</sup> P	Q <sup>*</sup> L	S <sub>P</sub> (%)	S <sub>L</sub> (%)
01	0,173	0,154	1	1	37	0,173	0,000	2	1
02	0,173	0,039	1	1	38	0,000	0,154	2	1
03	0,173	0,000	1	1	39	0,000	0,039	2	1
04	0,000	0,154	1	1	40	0,039	0,000	2	1
05	0,039	0,154	1	1	41	0,173	0,154	2	2
06	0,039	0,039	1	1	42	0,173	0,039	2	2
07	0,039	0,000	1	1	43	0,173	0,000	2	2
08	0,000	0,039	1	1	44	0,039	0,154	2	2
09	0,173	0,154	1	3	45	0,039	0,039	2	2
10	0,173	0,039	1	3	46	0,039	0,000	2	2
11	0,039	0,039	1	3	47	0,000	0,154	2	2
12	0,039	0,154	1	3	48	0,000	0,039	2	2
13	0,039	0,000	1	3	49	0,173	0,154	2	3
14	0,173	0,000	1	3	50	0,173	0,039	2	3
15	0,000	0,154	1	3	51	0,173	0,000	2	3
16	0,000	0,039	1	3	52	0,039	0,154	2	3
17	0,173	0,154	3	3	53	0,039	0,039	2	3
18	0,173	0,039	3	3	54	0,039	0,000	2	3
19	0,039	0,039	3	3	55	0,000	0,154	2	3
20	0,039	0,154	3	3	56	0,000	0,039	2	3
21	0,039	0,000	3	3	57	0,173	0,154	3	2
22	0,173	0,000	3	3	58	0,173	0,039	3	2
23	0,000	0,154	3	3	59	0,173	0,000	3	2
24	0,000	0,039	3	3	60	0,039	0,154	3	2
25	0,173	0,154	3	1	61	0,039	0,039	3	2
26	0,173	0,000	3	1	62	0,039	0,000	3	2
27	0,173	0,039	3	1	63	0,000	0,154	3	2
28	0,039	0,039	3	1	64	0,000	0,039	3	2
29	0,039	0,154	3	1	65	0,173	0,154	1	2
30	0,039	0,000	3	1	66	0,173	0,039	1	2
31	0,000	0,154	3	1	67	0,173	0,000	1	2
32	0,000	0,039	3	1	68	0,039	0,154	1	2
33	0,173	0,154	2	1	69	0,039	0,039	1	2
34	0,173	0,039	2	1	70	0,039	0,000	1	2
35	0,039	0,039	2	1	71	0,000	0,154	1	2
36	0,039	0,154	2	1	72	0,000	0,039	1	2

Fonte: Autor, 2019.

Entretanto, foram realizadas repetições das cinco primeiras condições experimentais devido ao fato de os operadores ainda não possuírem a expertise do controle preciso das vazões nos vertedores. A partir das repetições, padronizou-se os valores de vazão nos cinco primeiros ensaios com o restante das condições.

Assim, a partir da elaboração dessa indexação pode-se facilmente encontrar os dados requeridos, tanto em planilhas, quanto nos arquivos de vídeo.

#### 4.2 PROFUNDIDADE DO ESCOAMENTO ANTES DO TRANSIENTE HIDRÁULICO

Conforme apresentado no item 3.2.2., pode-se calcular a profundidade do escoamento através de medições do perímetro seco realizadas nos trechos de tubulação de PC transparente. Assim, foram representados, para as 9 seções de medição, os perímetros de ar conforme a Tabela 5 e as profundidades de escoamento conforme a Tabela 6. Ambas variáveis foram normalizadas pelo diâmetro interno da tubulação, obtendo um parâmetro adimensional de razão de aspecto. Além disso, pode-se calcular o número de Froude para cada uma das seções através da Equação 8, tendo como base os valores de vazões para cada ensaio e parâmetros de profundidade do escoamento conforme observado nas Tabelas 5 e 6. Por limitações físicas dimensionais do meio de publicação do presente trabalho, serão apresentados os dados referentes a primeira repetição de cada condição experimental.

Tabela 5 – Perímetros secos medidos e normalizados

(continua)

Índice do Ensaio	Perímetro Seco Normalizado (Ps/D)								
	Principal Jusante			Principal Montante			Lateral Montante		
	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante
01	1,79	1,68	1,58	0,00	0,11	0,36	0,49	0,49	0,49
02	2,00	1,88	1,79	1,08	1,19	1,29	1,21	1,21	1,24
03	2,11	2,04	1,95	1,79	1,80	1,79	1,84	1,87	1,91
04	2,14	2,07	1,95	1,37	1,45	1,51	1,79	1,85	1,92
05	2,03	1,97	1,83	1,04	1,11	1,20	1,31	1,28	1,39
06	2,32	2,26	2,19	1,68	1,73	1,87	1,73	1,77	1,79
07	2,53	2,53	2,40	2,28	2,28	2,25	2,49	2,55	2,56
08	2,52	2,52	2,39	2,09	2,20	2,26	2,24	2,26	2,31
09	1,77	1,71	1,58	0,00	0,29	0,57	0,57	1,79	1,96
10	1,98	1,94	1,81	1,16	1,32	1,68	1,22	1,43	1,73
11	2,33	2,23	2,16	1,66	1,77	1,89	1,96	2,42	2,44
12	2,02	1,98	1,83	1,03	1,14	1,24	2,11	2,08	2,11
13	2,58	2,54	2,49	2,33	2,31	2,28	2,56	2,94	3,14
14	2,13	2,11	2,00	1,86	1,84	1,77	1,98	2,17	2,41
15	2,15	2,05	1,92	1,28	1,43	1,53	2,08	2,12	2,17
16	2,52	2,52	2,34	2,03	2,13	2,26	2,42	2,42	2,42
17	1,81	1,74	1,54	0,42	1,81	2,07	0,53	1,62	2,13
18	2,02	1,96	1,82	2,09	2,08	2,08	1,68	2,41	2,42
19	2,35	2,26	2,17	1,94	2,42	2,42	2,01	2,42	2,44
20	2,04	1,95	1,83	1,09	1,42	1,89	2,11	2,11	2,11
21	2,53	2,54	2,49	2,46	2,44	2,44	2,79	3,04	3,14
22	2,16	2,11	2,08	2,11	2,11	2,11	2,42	2,63	3,14
23	2,12	2,08	2,00	1,47	1,71	1,99	2,11	2,11	2,11
24	2,49	2,51	2,41	2,13	2,42	3,36	2,42	2,42	2,42
25	1,81	1,71	1,60	0,40	2,00	2,08	0,42	0,47	0,54
26	2,13	2,13	2,06	2,06	2,08	2,08	2,34	2,40	2,44
27	2,02	1,97	1,83	2,05	2,06	2,07	1,60	1,63	1,68
28	2,34	2,27	2,21	1,97	2,40	2,42	1,81	1,85	1,89
29	2,02	2,00	1,83	1,18	1,41	1,84	1,26	1,32	1,66
30	2,51	2,51	2,48	2,44	2,44	2,44	2,58	2,62	2,76
31	2,14	2,11	1,96	1,49	1,71	1,95	1,83	1,85	1,89
32	2,47	2,47	2,40	2,15	2,40	3,36	2,17	2,21	2,23
33	1,80	1,69	1,58	0,21	0,74	1,71	0,46	0,48	0,55
34	2,00	1,98	1,79	2,02	2,00	2,00	1,47	1,41	1,45
35	2,29	2,29	2,21	1,85	2,35	2,34	1,79	1,80	1,83
36	2,02	1,95	1,81	1,07	1,27	1,47	1,18	1,20	1,33

Tabela 5 – Perímetros secos medidos e normalizados

(conclusão)

Índice do Ensaio	Perímetro Seco Normalizado (Ps/D)								
	Principal Jusante			Principal Montante			Lateral Montante		
	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante
37	2,17	2,15	2,04	2,03	2,03	2,02	2,21	2,25	2,29
38	2,15	2,12	2,00	1,47	1,62	1,82	1,83	1,85	1,87
39	2,46	2,47	2,38	2,12	2,28	2,55	2,19	2,22	2,22
40	2,51	2,48	2,44	2,35	2,35	2,35	2,53	2,55	2,59
41	1,81	1,71	1,60	0,27	0,76	1,74	0,40	0,57	0,72
42	2,01	1,98	1,81	2,02	2,02	2,02	1,33	1,41	1,53
43	2,16	2,14	2,03	2,02	2,01	2,01	2,23	2,32	2,42
44	2,02	1,95	1,79	1,11	1,28	1,56	1,68	1,99	2,08
45	2,32	2,27	2,20	1,92	2,34	2,34	1,80	2,02	2,38
46	2,48	2,48	2,44	2,37	2,37	2,36	2,55	2,63	2,87
47	2,14	2,07	1,92	1,41	1,60	1,83	2,01	2,00	2,04
48	2,49	2,49	2,39	2,14	2,32	2,60	2,35	2,34	2,35
49	1,81	1,71	1,60	0,27	0,74	1,73	0,46	1,24	2,11
50	2,02	1,97	1,81	2,00	2,00	2,00	1,47	1,65	2,04
51	2,16	2,13	2,12	2,02	2,02	2,02	2,28	2,42	2,65
52	2,02	1,96	1,81	1,07	1,35	1,58	2,04	2,11	2,12
53	2,29	2,27	2,18	1,85	2,34	2,34	1,95	2,38	2,38
54	2,51	2,51	2,43	2,37	2,37	2,36	2,59	2,82	3,36
55	2,15	2,07	1,89	1,35	1,58	1,79	2,09	2,09	2,11
56	2,51	2,51	2,40	2,11	2,32	2,57	2,40	2,40	2,40
57	1,81	1,71	1,60	0,25	1,84	2,06	0,42	0,61	0,82
58	2,01	1,99	1,84	2,05	2,07	2,09	1,62	1,73	2,02
59	2,17	2,14	2,06	2,06	2,06	2,06	2,29	2,44	2,62
60	2,02	1,96	1,83	1,07	1,42	1,85	1,71	2,00	2,06
61	2,31	2,26	2,18	1,96	2,40	2,40	1,84	2,32	2,34
62	2,51	2,51	2,40	2,42	2,42	2,40	2,65	2,80	3,02
63	2,15	2,08	1,94	1,47	1,68	1,94	2,02	2,02	2,04
64	2,48	2,48	2,38	2,11	2,39	3,36	2,34	2,34	2,34
65	1,79	1,72	1,58	0,00	0,15	0,39	0,44	0,61	0,82
66	2,02	1,96	1,84	1,16	1,26	1,45	1,22	1,32	1,47
67	2,14	2,07	1,98	1,82	1,84	1,79	1,92	2,02	2,13
68	2,02	1,98	1,83	0,97	1,05	1,14	1,68	2,00	2,04
69	2,32	2,29	2,19	1,68	1,75	1,81	1,79	2,11	2,37
70	2,51	2,49	2,42	2,23	2,23	2,19	2,37	2,51	2,77
71	2,15	2,06	1,94	1,37	1,43	1,48	2,01	1,99	2,02
72	2,51	2,51	2,41	2,04	2,11	2,22	2,36	2,36	2,35

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 6 – Profundidades do escoamento normalizadas

(continua)

Índice do Ensaio	Profundidade do Escoamento Normalizada (y/D)								
	Principal Jusante			Principal Montante			Lateral Montante		
	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante
1	0,44	0,49	0,54	1,00	1,00	0,97	0,95	0,95	0,95
2	0,34	0,39	0,44	0,76	0,71	0,67	0,70	0,70	0,69
3	0,29	0,32	0,36	0,44	0,43	0,44	0,41	0,40	0,38
4	0,28	0,31	0,36	0,63	0,59	0,57	0,44	0,41	0,38
5	0,32	0,35	0,42	0,77	0,75	0,71	0,66	0,67	0,62
6	0,21	0,23	0,26	0,49	0,47	0,40	0,47	0,45	0,44
7	0,13	0,13	0,17	0,22	0,22	0,23	0,14	0,12	0,12
8	0,13	0,13	0,18	0,30	0,25	0,23	0,23	0,23	0,21
9	0,45	0,48	0,54	1,00	0,98	0,93	0,93	0,44	0,36
10	0,35	0,37	0,43	0,73	0,66	0,49	0,70	0,60	0,47
11	0,20	0,24	0,27	0,50	0,45	0,39	0,36	0,17	0,16
12	0,33	0,35	0,42	0,78	0,74	0,69	0,29	0,30	0,29
13	0,11	0,13	0,14	0,20	0,21	0,22	0,12	0,03	0,01
14	0,28	0,29	0,34	0,40	0,41	0,45	0,35	0,27	0,17
15	0,27	0,31	0,38	0,67	0,60	0,56	0,30	0,29	0,27
16	0,13	0,13	0,20	0,32	0,28	0,23	0,17	0,17	0,17
17	0,43	0,46	0,56	0,96	0,43	0,31	0,94	0,52	0,28
18	0,33	0,36	0,42	0,30	0,30	0,30	0,49	0,17	0,17
19	0,19	0,23	0,27	0,37	0,17	0,17	0,33	0,17	0,16
20	0,32	0,36	0,42	0,75	0,61	0,39	0,29	0,29	0,29
21	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,06	0,02	0,01
22	0,27	0,29	0,30	0,29	0,29	0,29	0,17	0,10	0,01
23	0,29	0,30	0,34	0,58	0,48	0,34	0,29	0,29	0,29
24	0,14	0,14	0,17	0,28	0,17	0,00	0,17	0,17	0,17
25	0,43	0,48	0,53	0,96	0,34	0,30	0,96	0,95	0,94
26	0,28	0,28	0,31	0,31	0,30	0,30	0,20	0,17	0,16
27	0,33	0,35	0,42	0,31	0,31	0,31	0,53	0,51	0,49
28	0,20	0,22	0,25	0,35	0,17	0,17	0,43	0,41	0,39
29	0,33	0,34	0,42	0,72	0,61	0,41	0,68	0,66	0,50
30	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16	0,11	0,10	0,07
31	0,28	0,29	0,36	0,58	0,48	0,36	0,42	0,41	0,39
32	0,15	0,15	0,17	0,27	0,17	0,00	0,27	0,25	0,24
33	0,43	0,48	0,54	0,99	0,88	0,48	0,95	0,95	0,93
34	0,34	0,35	0,44	0,33	0,34	0,34	0,58	0,61	0,59
35	0,21	0,21	0,25	0,41	0,19	0,20	0,44	0,43	0,42
36	0,33	0,36	0,43	0,76	0,68	0,58	0,72	0,71	0,65

Tabela 6 – Profundidades do escoamento normalizadas

(conclusão)

Índice do Ensaio	Profundidade do Escoamento Normalizada (y/D)								
	Principal Jusante			Principal Montante			Lateral Montante		
	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante
37	0,27	0,27	0,32	0,32	0,32	0,33	0,25	0,23	0,21
38	0,27	0,29	0,34	0,58	0,52	0,42	0,42	0,41	0,40
39	0,15	0,15	0,18	0,29	0,22	0,12	0,26	0,24	0,24
40	0,14	0,15	0,16	0,19	0,19	0,19	0,13	0,12	0,11
41	0,43	0,48	0,53	0,98	0,88	0,46	0,96	0,93	0,89
42	0,33	0,35	0,43	0,33	0,33	0,33	0,65	0,61	0,56
43	0,27	0,28	0,32	0,33	0,33	0,33	0,24	0,21	0,17
44	0,33	0,36	0,44	0,75	0,67	0,55	0,49	0,34	0,30
45	0,21	0,22	0,25	0,38	0,20	0,20	0,43	0,33	0,18
46	0,15	0,15	0,16	0,19	0,19	0,19	0,12	0,10	0,04
47	0,28	0,31	0,38	0,61	0,53	0,42	0,33	0,34	0,32
48	0,14	0,14	0,18	0,28	0,21	0,11	0,19	0,20	0,19
49	0,43	0,48	0,53	0,98	0,88	0,47	0,95	0,69	0,29
50	0,33	0,35	0,43	0,34	0,34	0,34	0,58	0,50	0,32
51	0,27	0,28	0,29	0,33	0,33	0,33	0,22	0,17	0,09
52	0,33	0,36	0,43	0,76	0,64	0,54	0,32	0,29	0,29
53	0,21	0,22	0,26	0,41	0,20	0,20	0,36	0,18	0,18
54	0,14	0,14	0,16	0,19	0,19	0,19	0,11	0,05	0,00
55	0,27	0,31	0,39	0,64	0,54	0,44	0,30	0,30	0,29
56	0,14	0,14	0,17	0,29	0,21	0,12	0,17	0,17	0,17
57	0,43	0,48	0,53	0,99	0,41	0,31	0,96	0,92	0,86
58	0,33	0,34	0,41	0,31	0,31	0,30	0,52	0,47	0,33
59	0,27	0,28	0,31	0,31	0,31	0,31	0,21	0,16	0,10
60	0,33	0,36	0,42	0,76	0,61	0,41	0,48	0,34	0,31
61	0,21	0,23	0,26	0,36	0,17	0,17	0,41	0,21	0,20
62	0,14	0,14	0,17	0,17	0,17	0,17	0,09	0,06	0,02
63	0,27	0,30	0,37	0,58	0,49	0,37	0,33	0,33	0,32
64	0,15	0,15	0,18	0,29	0,18	0,00	0,20	0,20	0,20
65	0,44	0,47	0,54	1,00	1,00	0,97	0,96	0,92	0,86
66	0,33	0,36	0,41	0,73	0,68	0,59	0,70	0,66	0,58
67	0,28	0,31	0,35	0,42	0,41	0,44	0,38	0,33	0,28
68	0,33	0,35	0,42	0,80	0,77	0,74	0,49	0,34	0,32
69	0,21	0,21	0,26	0,49	0,46	0,43	0,44	0,29	0,19
70	0,14	0,14	0,17	0,24	0,24	0,26	0,19	0,14	0,06
71	0,27	0,31	0,37	0,63	0,60	0,58	0,33	0,34	0,33
72	0,14	0,14	0,17	0,32	0,29	0,24	0,19	0,19	0,19

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 7 – Números de Froude calculados

(continua)

Índice do Ensaio	Número de Froude ( $U/\sqrt{g h_m}$ )								
	Principal Jusante			Principal Montante			Lateral Montante		
	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante
1	1,87	1,52	1,26	FP	FP	0,16	0,17	0,17	0,17
2	1,97	1,49	1,21	0,34	0,38	0,44	0,09	0,09	0,09
3	2,14	1,79	1,41	0,99	1,01	0,99	-	-	-
4	2,09	1,74	1,26	-	-	-	0,88	1,01	1,16
5	1,95	1,66	1,21	0,07	0,08	0,09	0,39	0,38	0,44
6	1,92	1,59	1,25	0,18	0,20	0,27	0,20	0,21	0,22
7	2,32	2,32	1,33	0,86	0,86	0,77	-	-	-
8	2,20	2,20	1,27	-	-	-	0,74	0,80	0,92
9	1,79	1,58	1,26	FP	0,14	0,20	0,18	0,88	1,29
10	1,87	1,68	1,27	0,37	0,45	0,80	0,09	0,12	0,20
11	1,99	1,43	1,13	0,18	0,21	0,28	0,33	1,45	1,58
12	1,90	1,70	1,21	0,07	0,08	0,09	1,91	1,80	1,91
13	3,02	2,44	2,00	1,00	0,92	0,86	-	-	-
14	2,27	2,14	1,61	1,16	1,10	0,95	-	-	-
15	2,16	1,65	1,16	-	-	-	1,80	1,96	2,30
16	2,20	2,20	1,04	-	-	-	1,45	1,45	1,45
17	1,95	1,68	1,18	0,17	1,03	1,95	0,17	0,64	2,03
18	2,08	1,77	1,30	2,07	2,01	2,01	0,18	1,38	1,45
19	2,16	1,59	1,17	0,31	1,45	1,45	0,37	1,45	1,58
20	2,01	1,58	1,21	0,08	0,12	0,28	1,91	1,91	1,91
21	2,32	2,44	2,00	1,73	1,58	1,58	-	-	-
22	2,50	2,14	2,01	2,14	2,14	2,14	-	-	-
23	1,96	1,80	1,43	-	-	-	1,91	1,91	1,91
24	2,00	2,10	1,38	-	-	-	1,45	1,45	1,45
25	1,95	1,58	1,31	0,17	1,61	2,01	0,15	0,16	0,17
26	2,27	2,27	1,90	1,90	2,01	2,01	-	-	-
27	2,08	1,82	1,32	1,84	1,90	1,95	0,16	0,17	0,18
28	2,07	1,65	1,34	0,34	1,33	1,45	0,23	0,26	0,28
29	1,90	1,80	1,21	0,09	0,12	0,25	0,37	0,40	0,69
30	2,10	2,10	1,90	1,58	1,58	1,58	-	-	-
31	2,09	1,91	1,29	-	-	-	0,96	1,01	1,11
32	1,81	1,81	1,33	-	-	-	0,58	0,67	0,72
33	1,91	1,55	1,26	0,12	0,24	0,84	0,16	0,16	0,18
34	1,97	1,87	1,21	1,70	1,61	1,61	0,13	0,12	0,12
35	1,78	1,78	1,34	0,26	1,08	1,04	0,22	0,23	0,24
36	1,90	1,58	1,15	0,08	0,10	0,13	0,34	0,35	0,41

Tabela 7 – Números de Froude calculados

(conclusão)

Índice do Ensaio	Número de Froude ( $U/\sqrt{g h_m}$ )								
	Principal Jusante			Principal Montante			Lateral Montante		
	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante	Jusante	Médio	Montante
37	2,58	2,42	1,79	1,74	1,74	1,70	-	-	-
38	2,16	1,96	1,43	-	-	-	0,96	1,01	1,06
39	1,73	1,81	1,22	-	-	-	0,62	0,69	0,69
40	2,10	1,90	1,58	1,08	1,08	1,08	-	-	-
41	1,95	1,58	1,31	0,14	0,24	0,89	0,15	0,18	0,21
42	2,02	1,87	1,27	1,70	1,70	1,70	0,10	0,12	0,14
43	2,50	2,34	1,74	1,70	1,65	1,65	-	-	-
44	1,90	1,58	1,11	0,08	0,10	0,15	0,72	1,39	1,80
45	1,92	1,65	1,29	0,30	1,04	1,04	0,23	0,38	1,22
46	1,90	1,90	1,58	1,17	1,17	1,12	-	-	-
47	2,09	1,74	1,16	-	-	-	1,47	1,43	1,60
48	2,00	2,00	1,27	-	-	-	1,08	1,04	1,08
49	1,95	1,58	1,31	0,14	0,24	0,87	0,16	0,36	1,91
50	2,08	1,82	1,27	1,61	1,61	1,61	0,13	0,17	0,41
51	2,50	2,27	2,20	1,70	1,70	1,70	-	-	-
52	1,90	1,62	1,15	0,08	0,11	0,15	1,60	1,91	1,96
53	1,78	1,65	1,21	0,26	1,04	1,04	0,32	1,22	1,22
54	2,10	2,10	1,51	1,17	1,17	1,12	-	-	-
55	2,16	1,74	1,11	-	-	-	1,85	1,85	1,91
56	2,10	2,10	1,33	-	-	-	1,33	1,33	1,33
57	1,95	1,58	1,31	0,13	1,10	1,90	0,15	0,19	0,23
58	2,02	1,92	1,36	1,84	1,95	2,07	0,16	0,20	0,38
59	2,58	2,34	1,90	1,90	1,90	1,90	-	-	-
60	1,90	1,62	1,21	0,08	0,12	0,26	0,75	1,43	1,69
61	1,84	1,59	1,21	0,33	1,33	1,33	0,25	0,96	1,04
62	2,10	2,10	1,33	1,45	1,45	1,33	-	-	-
63	2,16	1,80	1,22	-	-	-	1,51	1,51	1,60
64	1,90	1,90	1,22	-	-	-	1,04	1,04	1,04
65	1,87	1,61	1,26	FP	FP	0,16	0,16	0,19	0,23
66	2,08	1,77	1,36	0,37	0,42	0,54	0,09	0,10	0,13
67	2,34	1,95	1,52	1,06	1,10	0,99	-	-	-
68	1,90	1,70	1,21	0,07	0,07	0,08	0,72	1,43	1,60
69	1,92	1,78	1,25	0,18	0,21	0,23	0,22	0,48	1,17
70	2,10	2,00	1,45	0,72	0,72	0,62	-	-	-
71	2,16	1,69	1,22	-	-	-	1,47	1,39	1,51
72	2,10	2,10	1,38	-	-	-	1,12	1,12	1,08

Fonte: Autor, 2019.

Nota-se que na Tabela 7 apresentam-se as siglas “-“ e “FP”. A sigla “-“ refere-se aos condutos que no ensaio em questão a vazão no trecho era nula. Por mais que haja algum valor de profundidade de escoamento, apresentado na Tabela 6, a água está estática, não apresentando vazão. Assim, não se apresentam forças inerciais no escoamento, invalidando a avaliação do número de Froude.

Já a sigla “FP” refere-se a situações em que o conduto está operando em seção plena ou quase plena. Nesse sentido, a largura da lâmina livre é nula ou praticamente nula, invalidando a metodologia de cálculo utilizada no item 3.2.2. Entretanto, ainda assim existem relações entre forças inerciais e gravitacionais do escoamento. Contudo, o presente trabalho não se aprofundará em discussões relacionadas ao significado físico dessas situações.

Percebe-se que o escoamento é caracterizado como supercrítico nas três seções do TPJ para todas as condições experimentais, fato que apresenta conformidade com os resultados esperados visto que o trecho possui maior declividade.

Os dados de perímetros de ar, profundidades do escoamento e números de Froude relativos a todas as repetições estão em posse do *Grupo de Pesquisas em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias* e podem ser requisitados através do autor ou orientador do presente trabalho.

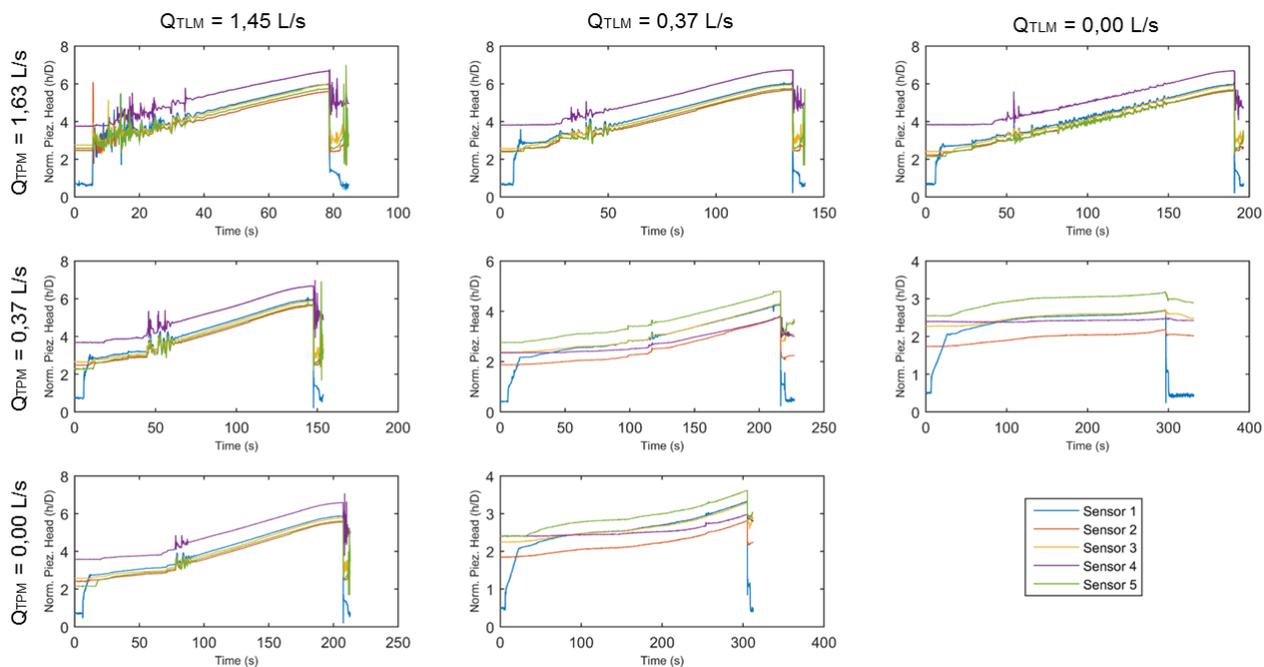
#### 4.3 SÉRIES DE PRESSÕES

Os dados coletados pelos sensores foram indexados conforme a Tabela 4. Assim, o banco de dados de séries de pressões constituiu-se de 72 planilhas, cada uma contendo os dados relativos às medições dos seis sensores de pressão para determinada condição experimental e para as três repetições ensaiadas. Estes dados podem ser encontrados em termos de tensão ou de carga hidráulica, conforme a intenção desejada.

Além disso, pode-se representar de forma gráfica estas séries de pressões. No corpo do presente trabalho, devido à dificuldade de apresentar um amplo banco de dados de forma gráfica, optou-se pela representação de apenas a primeira repetição

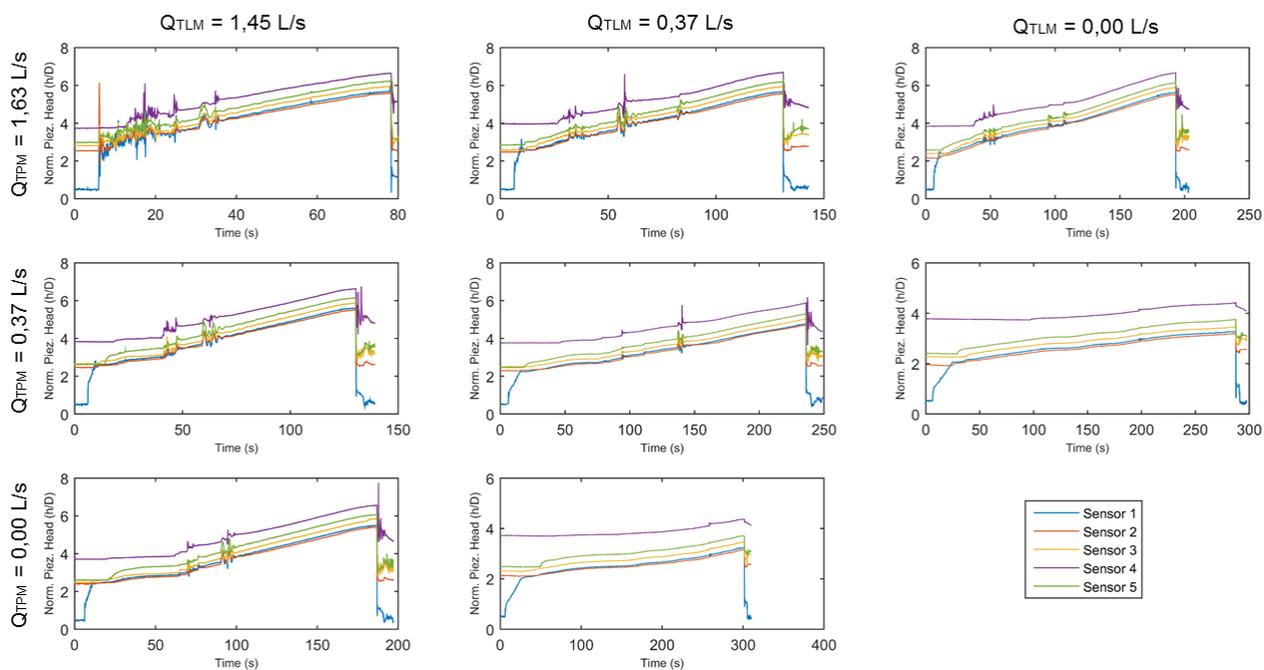
de cada condição experimental. Assim, a sequência de figuras abaixo (Figura 25 a Figura 33) apresenta as séries de pressões obtidas para a primeira repetição de todas as condições experimentais ensaiada, sendo as linhas da matriz de gráficos referentes ao TPM e as colunas referentes ao TLM.

Figura 25 – Séries de pressões para declividades de 1% e 1% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



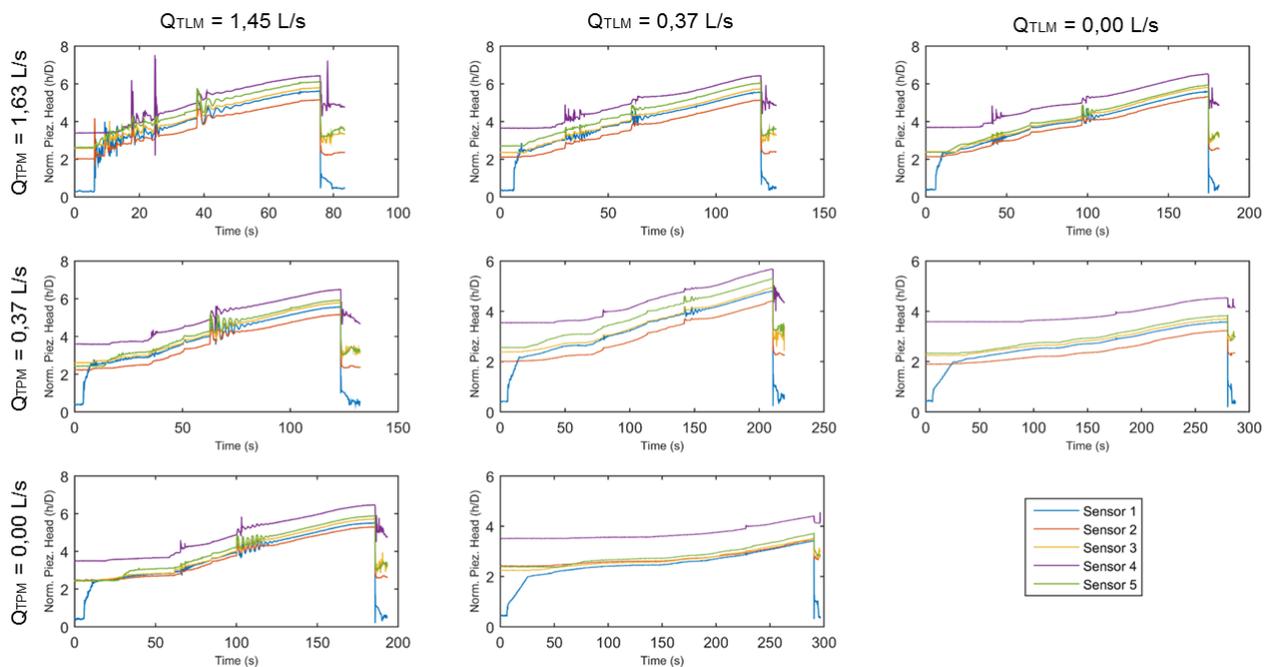
Fonte: Autor, 2019.

Figura 26 – Séries de pressões para declividades de 1% e 2% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



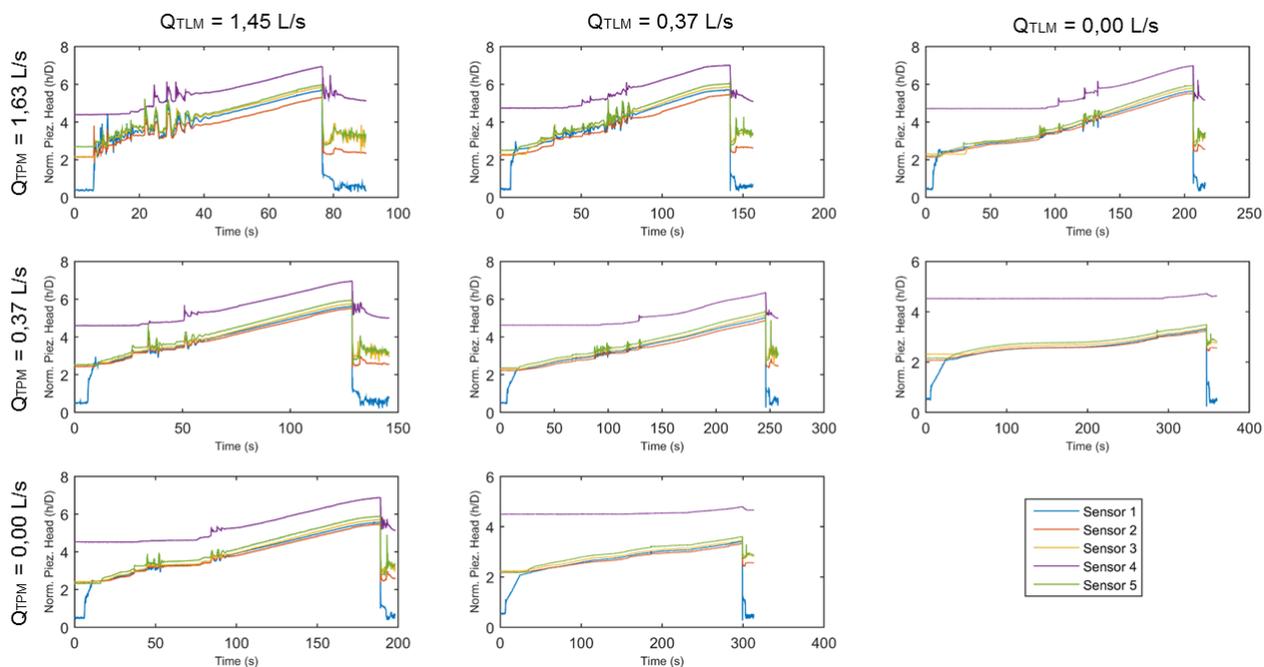
Fonte: Autor, 2019.

Figura 27 – Séries de pressões para declividades de 1% e 3% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



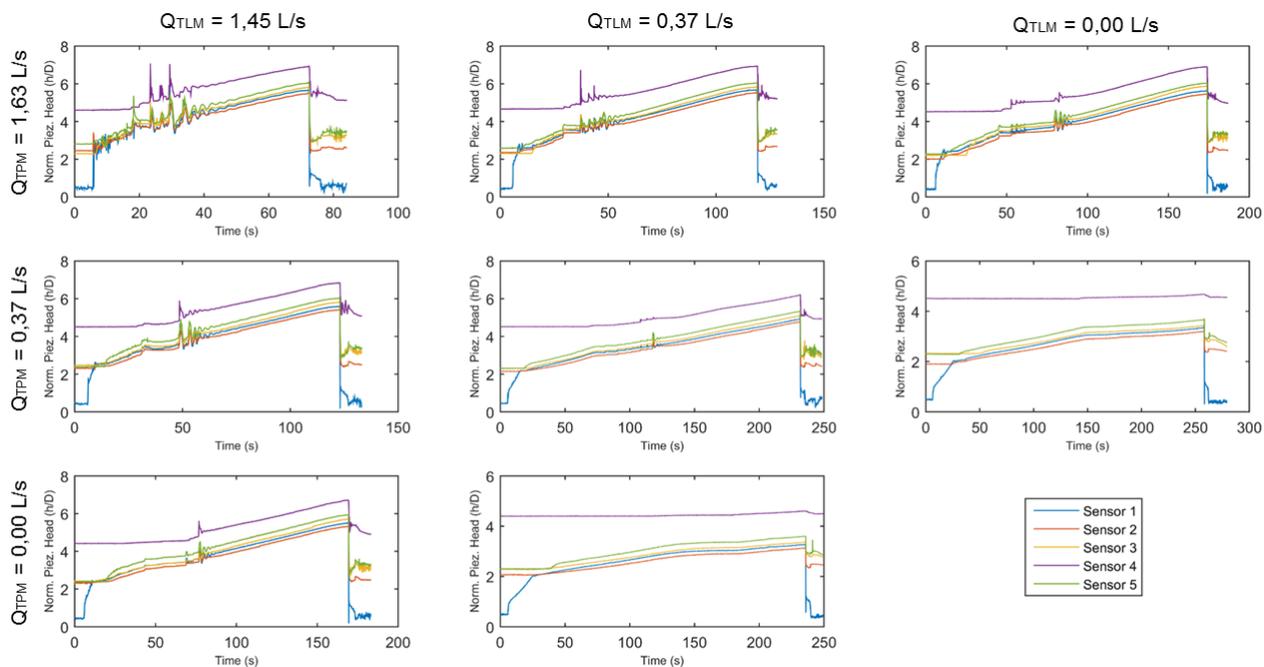
Fonte: Autor, 2019.

Figura 28 – Séries de pressões para declividades de 2% e 1% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



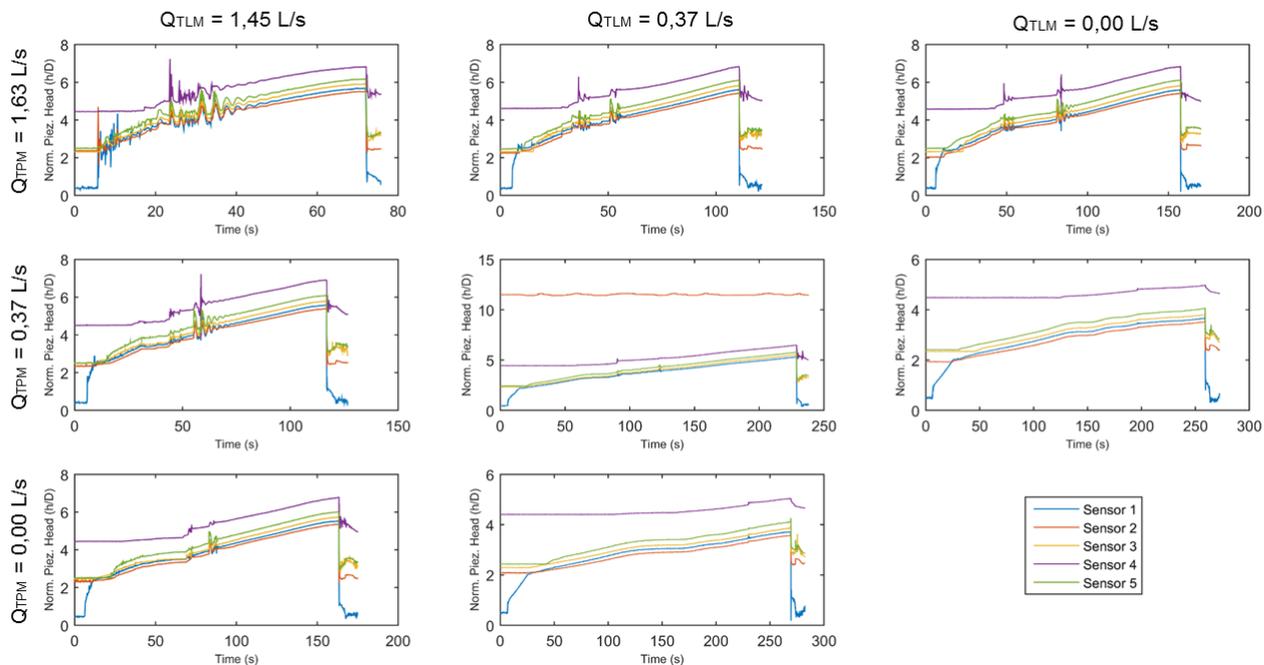
Fonte: Autor, 2019.

Figura 29 – Séries de pressões para declividades de 2% e 2% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



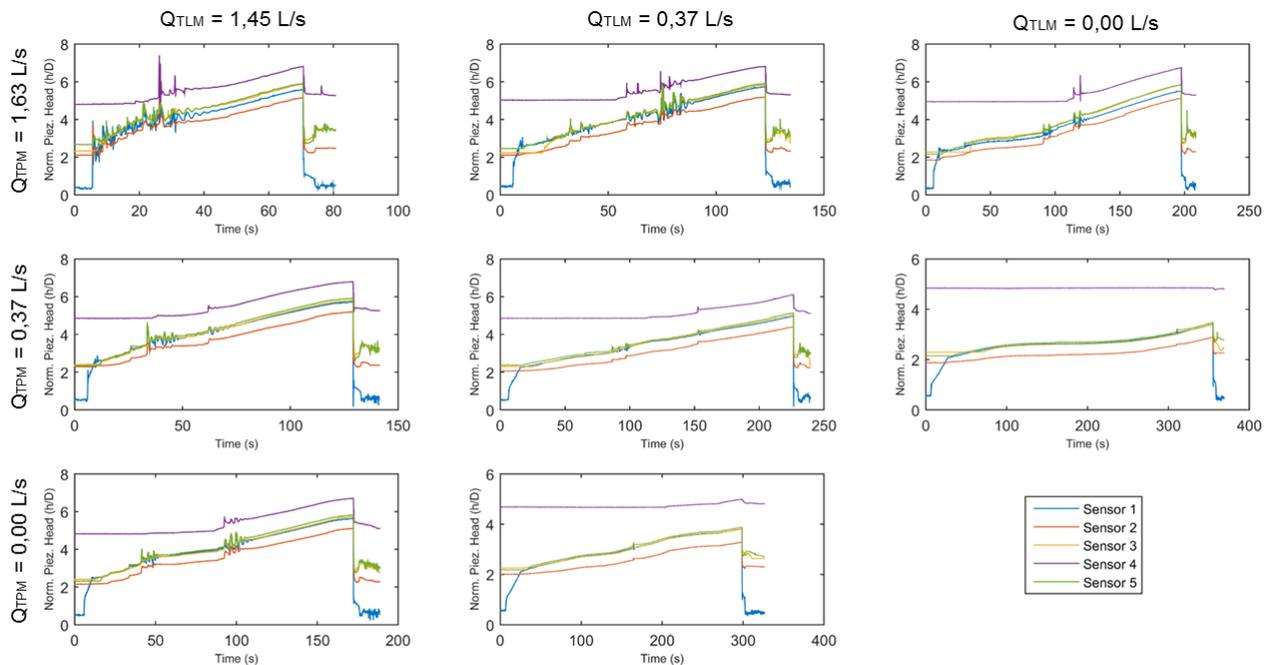
Fonte: Autor, 2019.

Figura 30 – Séries de pressões para declividades de 2% e 3% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



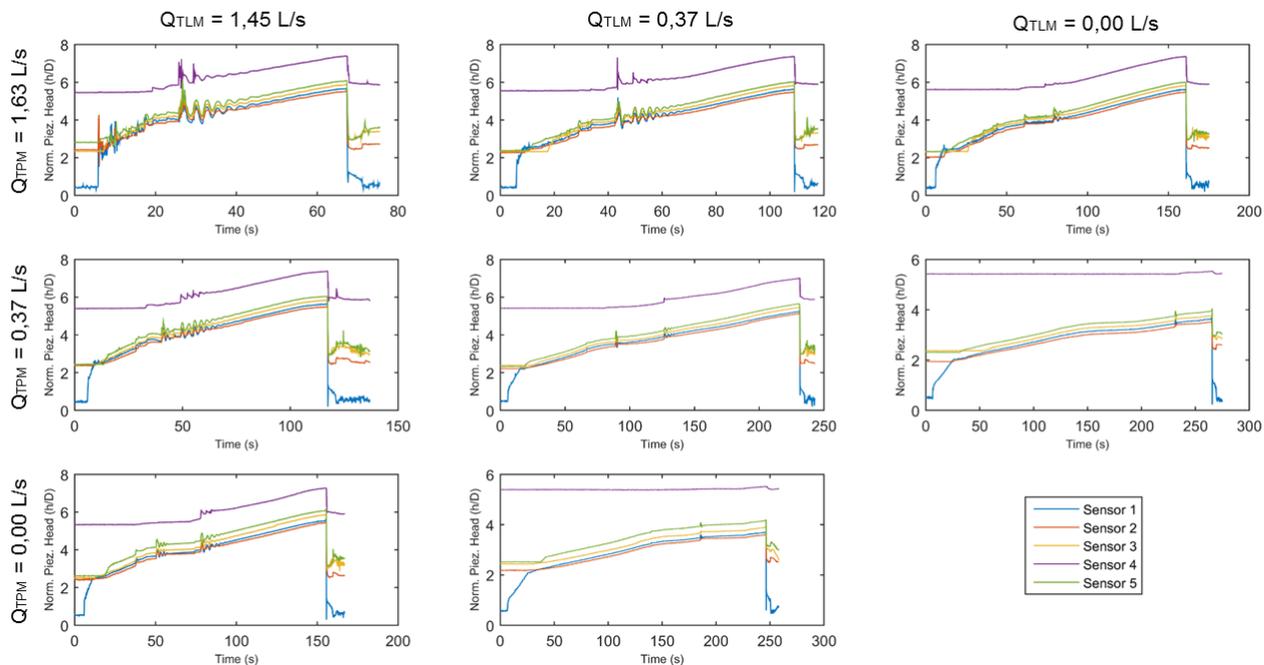
Fonte: Autor, 2019.

Figura 31 – Séries de pressões para declividades de 3% e 1% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



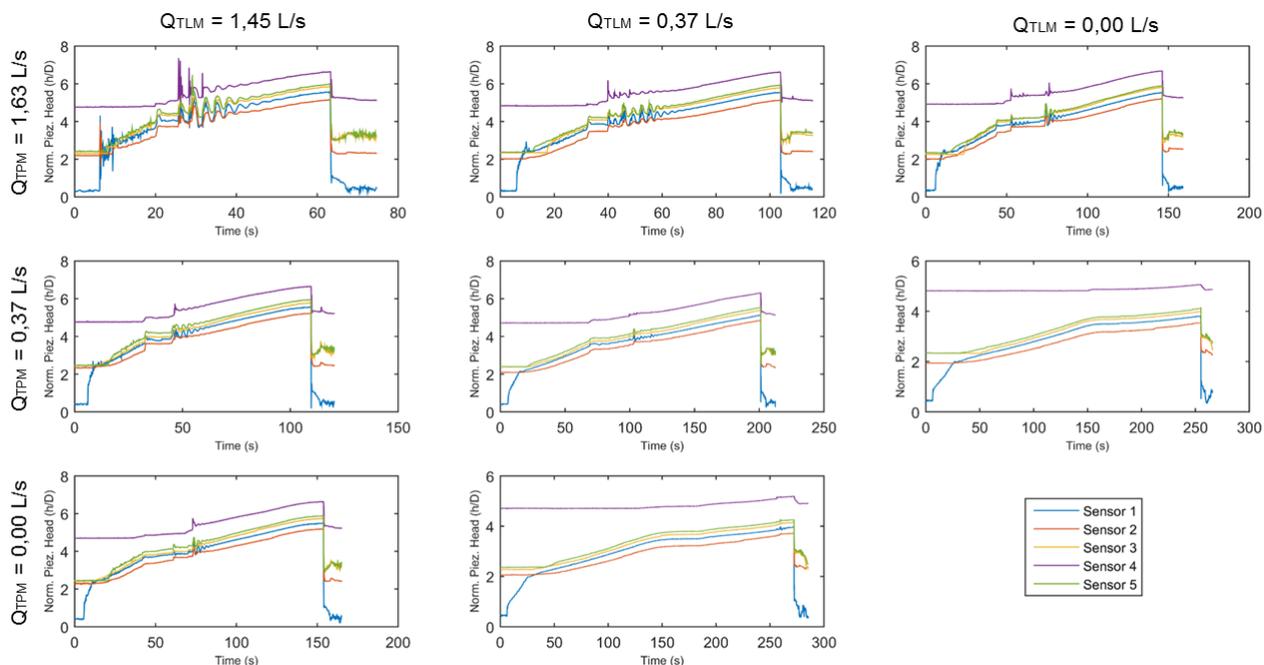
Fonte: Autor, 2019.

Figura 32 – Séries de pressões para declividades de 3% e 2% nos trechos TPM e TLM, respectivamente



Fonte: Autor, 2019.

Figura 33 – Séries de pressões para declividades de 3% e 3% nos trechos TPM e TLM, respectivamente

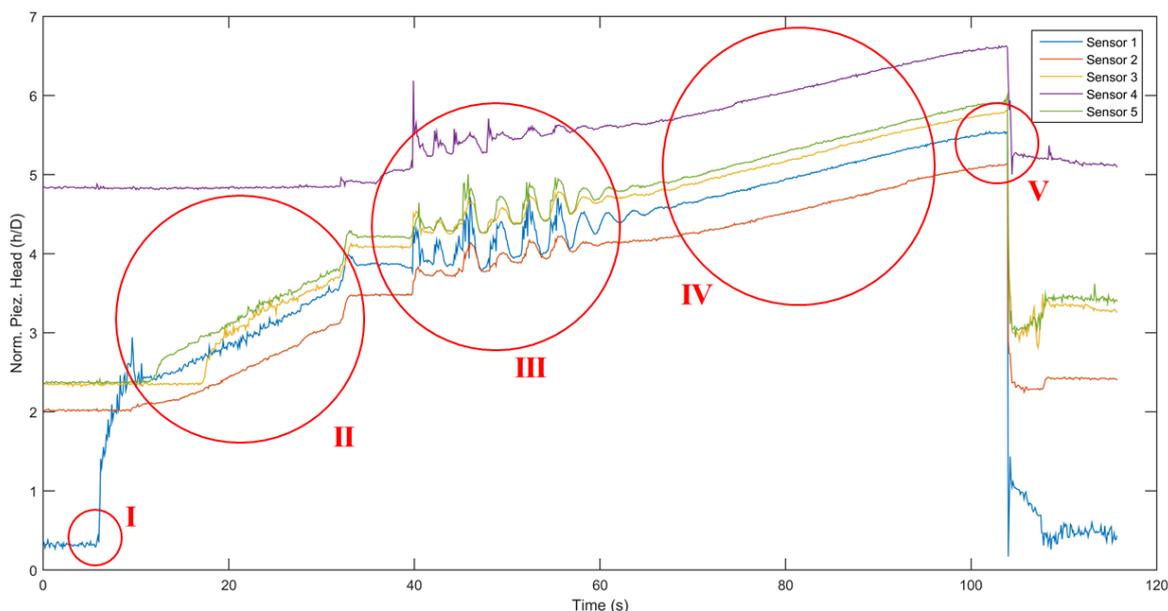


Fonte: Autor, 2019

Destaca-se que ocorreram falhas nas leituras realizadas pelo Sensor 6, resultando em oscilações anômalas, fora da realidade experimental apresentada. Ressalta-se que, quando constatadas estes erros de leitura, testou-se a troca de posição deste sensor por outro, visando averiguar se o erro não era ocasionado pela posição de instalação. Apurou-se que o problema realmente consistia, de fato, no Sensor 6. Assim, descartaram-se os dados medidos por este sensor nas representações gráficas apresentadas acima.

De maneira geral, pode-se destacar alguns pontos específicos das séries de pressões adquiridas, conforme a Figura 34.

Figura 34 – Pontos característicos das séries de pressões



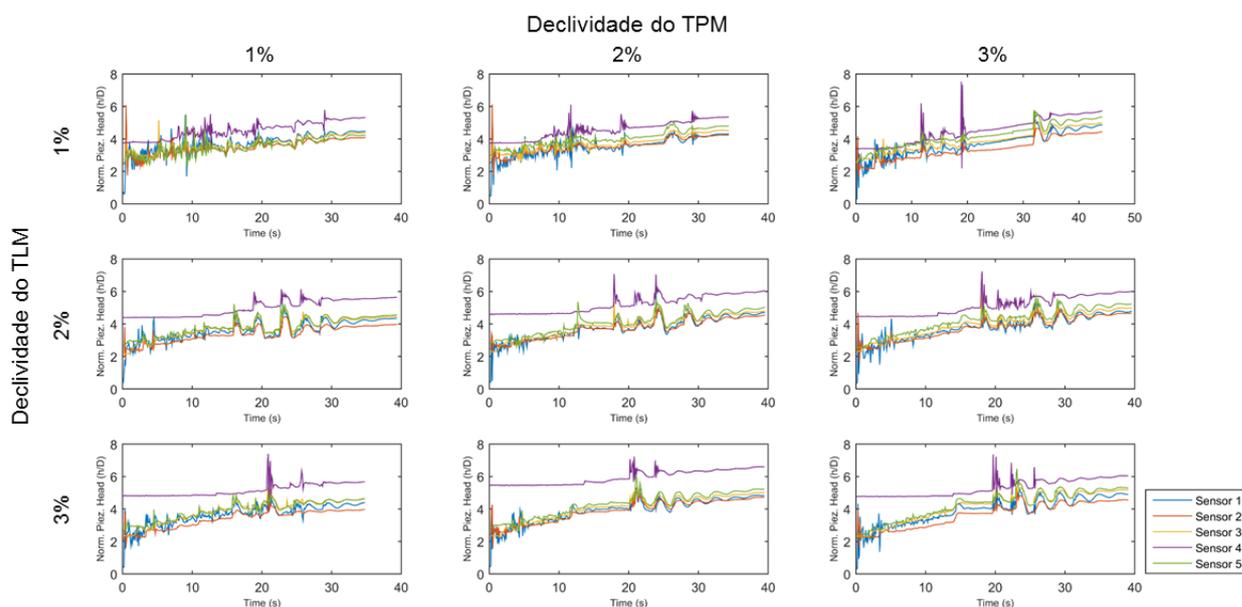
Fonte: Autor, 2019.

O ponto I representa o instante logo após o fechamento da válvula guilhotina. Este ponto é marcado por um abrupto acréscimo de pressão, indicando o início do enchimento do sistema. Nota-se que para os ensaios com vazões máximas nos trechos TPM e TLM esse pico de pressão é seguido por grandes oscilações, indicando um possível transiente rápido de pressões. As regiões II e IV representam um acréscimo gradual de carga no sistema, ocasionado pelo enchimento da tubulação. Acredita-se que a região III é representada pela liberação do ar aprisionado dentro das tubulações. Já o ponto V é marcado pela reabertura da válvula guilhotina, ocasionando um decréscimo abrupto de carga no sistema, aproximando-se dos valores de origem.

Ademais, percebe-se que existem grandes oscilações nas séries de pressões em ensaios com maiores vazões, as quais necessitam de uma janela de plotagem mais restrita para uma melhor avaliação. Na Figura 35 apresenta-se esta visualização mais restrita para os casos em análise. Dentro disso, discorre-se sobre a ideia do tempo de análise dos ensaios. A leitura dos sensores inicia-se aproximadamente 4 segundos antes do fechamento da válvula guilhotina. Assim, estes dados iniciais são de pouca importância para o escopo experimental, podendo ser suprimidos das análises. Além disso, mais evidente nos casos em que são ensaiadas menores vazões, nota-se que há um aumento gradual da carga hidráulica medida pelos

sensores, representando apenas o enchimento gradual do sistema. Portanto, também pode-se suprimir das análises parte destes dados, visto que apenas ocorre um aumento gradativo de pressão até o término do ensaio.

Figura 35 – Séries de pressões para vazões inteira nos trechos TPM e TLM



Fonte: Autor, 2019.

Por fim, destaca-se que o presente estudo se deteve apenas na geração de um banco de dados experimental. Logo, a extensão de análise destes dados será abordada em trabalhos futuros.

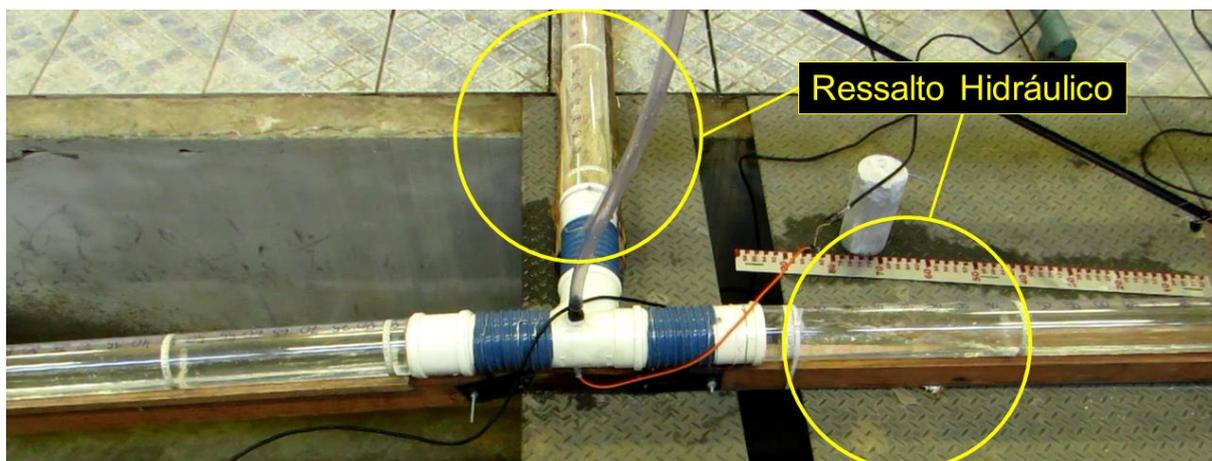
Os dados de séries de pressões relativos a todas as repetições estão em posse do *Grupo de Pesquisas em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias* e podem ser requisitados através do autor ou orientador do presente trabalho.

#### 4.4 ANÁLISES QUALITATIVAS DE CASOS SIGNIFICATIVOS

Durante as corridas experimentais foram tomadas algumas observações qualitativas em relação a cada condição ensaiada e estas foram transcritas nos formulários de coleta (Apêndice 3). Assim, foi possível confrontar estas informações, as quais podem ser revistas através da análise visual, com os dados obtidos pelos sensores de pressão.

Como exemplo apresenta-se a ocorrência de ressaltos hidráulicos em trechos a montante da junção antes do fechamento da válvula. Na condição experimental número 17, por exemplo, foi verificada a ocorrência de ressaltos em ambos os trechos a montante (TPM e TLM), conforme observado na Figura 36.

Figura 36 – Ocorrência de ressaltos hidráulicos nos trechos TPM e TLM antes do fechamento da válvula guilhotina



Fonte: Autor, 2019.

Atenta-se ao fato que essa situação também pode ser observada na transição do regime de escoamento, de supercrítico para subcrítico, representado através dos números de Froude calculados e apresentados na Tabela 5. A ocorrência de ressaltos hidráulicos foi manifestada também em outros casos, com mais frequência em maiores declividades, circunstância lógica visto que o escoamento apresenta maiores velocidades, gerando um predomínio de forças inerciais no escoamento. O estudo de ressaltos hidráulicos em condutos circulares torna-se muito mais complexo do que em canais retangulares ou prismáticos, visto que a variação de forças de fricção e momento linear não possuem variação linear ao longo da seção transversal.

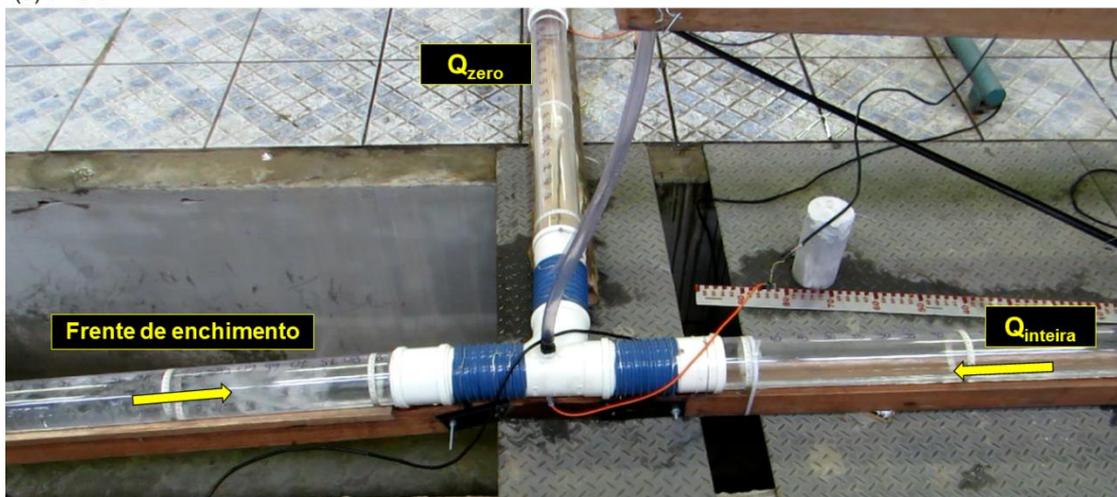
De todos os casos testados destacam-se casos em que foram ensaiadas vazões máximas em um dos condutos e vazão nula em outro. O índice desses casos, conforme apresentado na Tabela 4 são: 03, 04, 14, 15, 22, 23, 26, 31, 37, 38, 43, 47, 51, 55, 59, 63, 67, 71. Após o fechamento da válvula guilhotina a onda de cheia desloca-se de jusante para montante até a chegada ao PV. Posteriormente, embora a situação mais lógica pareça o enchimento do tubo que possui alimentação de vazão, esse fato não ocorre. A frente de enchimento continua a deslocar-se para montante, de forma lenta, no tubo em que possui alimentação de vazão, enquanto o trecho que

não possui alimentação apresenta um enchimento gradual. Entretanto, o tubo que não possui alimentação de vazão é preenchido primeiramente de água em relação ao outro trecho de tubulação que está sendo alimentado. Além disso, no trecho em que havia alimentação de vazão apresenta formação de bolsões de ar após a passagem da frente de enchimento.

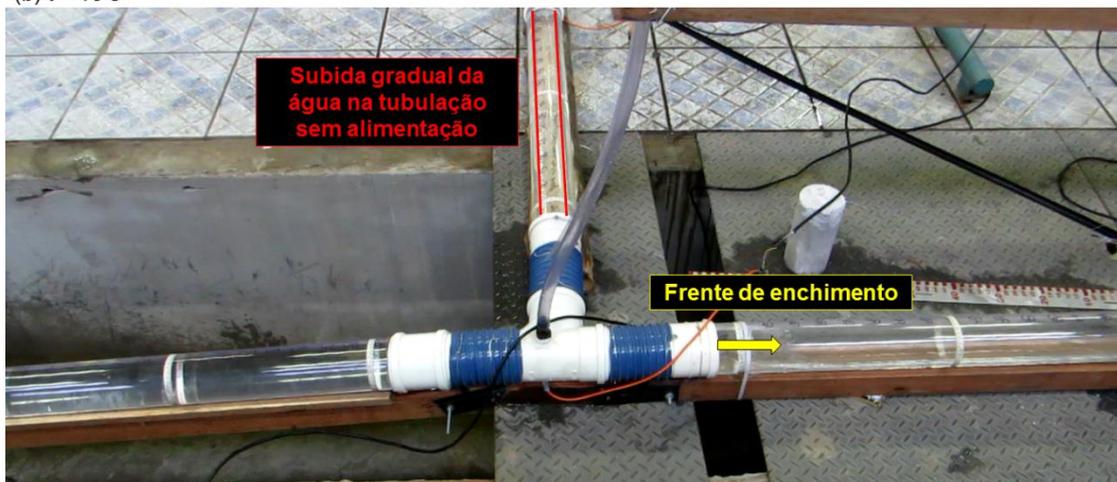
A Figura 37 apresenta uma sequência de quadros demonstrando o fato relatado no parágrafo acima.

Figura 37 – Enchimento das tubulações para vazão inteira e zero nos trechos TPM e TLM, respectivamente

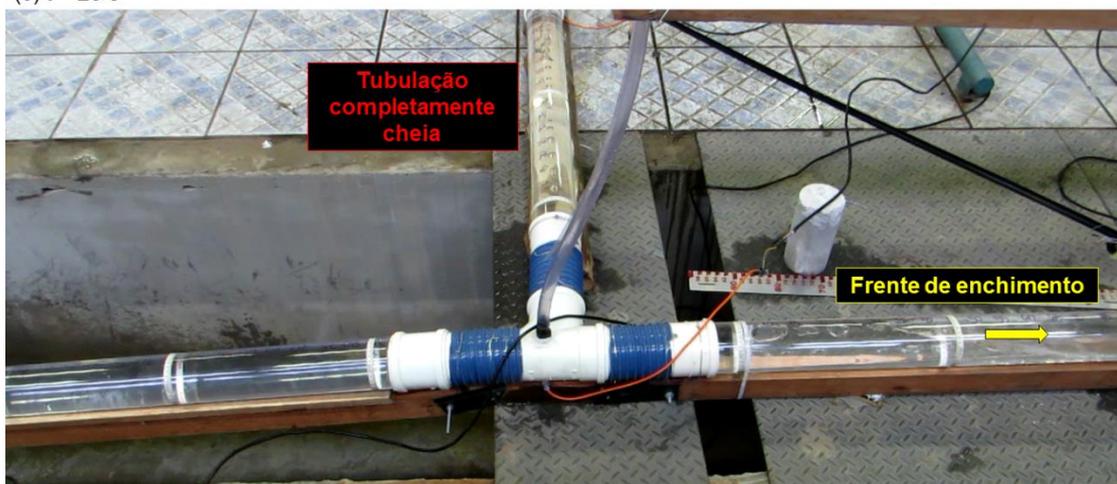
(a)  $t = 3$  s



(b)  $t = 16$  s



(c)  $t = 26$  s



Fonte: Autor, 2019.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da realização do experimento descrito, verificou-se a importância da elaboração de um banco de dados organizado de forma lógica e sistemática para a sintetização de dados experimentais, o que foi apresentado no presente trabalho. Dessa maneira torna-se possível a acessibilidade, de forma prática, destes dados para os requeridos fins do usuário. A partir destes dados serão realizadas simulações numéricas computacionais em diversos modelos a fim de validar a utilização dos mesmos em condições tais como as realizadas no experimento físico.

Entretanto, houveram dificuldades na descrição do fenômeno hidráulico abordado no presente trabalho, visto a sua complexidade. Por mais que o layout do sistema possua características bidimensionais – se avaliando seus condutos – através da visualização do escoamento, nota-se que o mesmo possui características tridimensionais de relevância. Além disso, durante a ocorrência do transiente hidráulico manifesta-se a existência de um escoamento misto de água e ar, fator que também dificulta a descrição do fenômeno ocorrido.

Ressalta-se que o presente trabalho se caracteriza como a primeira etapa de uma série de estudos sobre transientes hidráulicos em redes de drenagem, mais especificamente em junções de distintos trechos de rede. Os trabalhos conseguintes abordarão tanto temas relacionados a modelagem numérica dos fenômenos observados no presente trabalho quanto novas análises experimentais físicas em diferentes configurações experimentais.

Ainda não se dispõe do conhecimento de quais modelos matemáticos e numéricos são os mais indicados para este tipo de modelagem. Foi notável, durante a realização das corridas experimentais, que o ar possui influência no escoamento nas condições experimentais ensaiadas. Assim, pressupõe-se que modelos matemáticos que comportam escoamentos bifásicos sejam uma boa tentativa para modelar os fenômenos observados.

Além disso, para a tentativa de simular as distribuições de pressões nos condutos de forma mais detalhada nas proximidades do PV, presume-se que a tentativa de utilizar modelos tridimensionais de escoamentos bifásicos seja válida, tal como o solver InterFoam contido no código OpenFOAM, que comporta a simulação

de dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis dentro de um volume de controle.

Entretanto, como tentativa inicial, realizar-se-á simulações no modelo SWMM nas versões 5.1.012 e 5.1.013, o qual não compreende escoamentos bifásicos em seu código, mas possui grande popularidade e ampla utilização, tanto em meio acadêmico quanto em meio profissional. A partir da comparação dos dados simulados com os dados observados será possível a verificação da utilidade deste modelo para as situações observadas no presente estudo. Além disso planeja-se realizar simulações com a utilização de uma discretização espacial artificial, conforme apresentado por Pachaly (2019), a fim de uma melhor representação do transiente hidráulico.

Sugere-se para pesquisas futuras, além das simulações numéricas computacionais citadas nos parágrafos anteriores, a aquisição de dados de profundidade do escoamento e séries de pressões para outras configurações experimentais, tais como: a variação da declividade do trecho de saída, verificando os impactos que serão ocasionados a montante; variação do ângulo de chegada do trecho lateral; variação dos diâmetros de entrada e saídas da junção; colocação de uma obstrução parcial na saída do sistema, gerando uma curva de remanso a montante; entre outras configurações.

Além disso, para a mesma configuração ensaiada no presente trabalho, sugere-se a realização de corridas experimentais substituindo a junção utilizada no PV (tê, DN 100, SN) por um dispositivo de maior área superficial, simulando um poço de visita em escala real. No presente estudo a área superficial foi compreendida pelo piezômetro instalado no topo do PV, constituído por um trecho de mangueira transparente, resultando em uma área superficial muito pequena. Assim, realizando a substituição citada será possível averiguar o amortecimento gerado nas distribuições de pressão a partir do efeito escala da área superficial da junção.

Portanto, ressalta-se a importância de estudos realizados em modelos físicos reduzidos em paralelo a simulações numéricas computacionais, tanto para a calibração de modelos computacionais quanto para a validação dos mesmos. O desenvolvimento de modelos computacionais mais acurados torna a prática de engenharia mais célere e precisa.

## 6 REFERÊNCIAS

ARDUINO. 2019. Disponível em:<<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em 21 nov. 2019.

AURELI, F. et al. Validation of single- and two-equation models for transient mixed flows: A laboratory test case. **Journal of Hydraulic Research**, v. 53, n. 4, p. 440–451, 2015.

BEG, M. N. A. et al. Numerical investigation of the flow field inside a manhole-pipe drainage system. **6th International Symposium on Hydraulic Structures: Hydraulic Structures and Water System Management, ISHS 2016**, n. July, p. 61–71, 2016.

BRASIL, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. **Manual de drenagem de Rodovias**, 2. ed. - Rio de Janeiro, 2006.

CHAUDHRY, M. H. **Open Channel Flow**. Springer Science & Business Media, 2008. P. 523. ISBN 9780387301747. DOI: 10.1007/978-0-387-68648-6.

CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. London: Pitman publishing, 1980.

DA SILVA, J. K. **Identificação de instabilidades hidráulicas em sistema de drenagem urbana - investigação experimental do conduto forçado Álvaro Chaves**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FERRERI, G. B.; CIRAOLO, G.; LO RE, C. Storm sewer pressurization transient - An experimental investigation. **Journal of Hydraulic Research**, v. 52, n. 5, p. 666–675, 2014.

FERRERI, G. B.; FRENI, G.; TOMASELLI, P. Ability of Preissmann slot scheme to simulate smooth pressurisation transient in sewers. **Water Science and Technology**, v. 62, n. 8, p. 1848–1858, 2010.

GUO, Q.; SONG, C. C. S. Surging in Urban Storm Drainage Systems. **Journal of**

**Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1523–1537, dez. 1990.

HAGER, W. H.; GISONNI, C. Supercritical flow in sewer manholes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 43, n. 6, p. 660–667, 2005.

HAMAM, M. A.; MCCORQUODALE, J. A. Transient Conditions in the Transition From Gravity To Surcharged Sewer Flow. **Canadian journal of civil engineering**, v. 9, n. 2, p. 189–196, 1982.

LI, J.; MCCORQUODALE, A. Modeling Mixed Flow in Storm Sewers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 11, p. 1170–1180, nov. 1999.

LOPES, P. et al. Numerical and experimental investigation of a gully under surcharge conditions. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 6, p. 468–476, 2015.

PACHALY, R. L. **Assessment of swmm approaches to simulate dynamic conditions in stormwater systems**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

POPESCU, I. **Computational Hydraulics**. London: IWA Publishing, 2014. ISBN 9781780400440.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. cap. 12, p. 351-414.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. cap. 10, p. 381-434.

RAMOS, C. L.; BARROS, M. T. L de; PALOS, J. C. F. (Orgs.). **Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo**. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 1999.

ROESNER, L. A.; ALDRICH, J. A.; DICKINSON, R. E.; BARNWELL, T. O. **Storm Water Management Model User's Manual, Version 4: EXTRAN Addendum**. Athens: Environmental Research Laboratory, Office of Research e Development, US Environmental Protection Agency, 1988.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model Quality Assurance Report: Dynamic Wave Flow Routing. **Storm Water Management Model Quality Assurance Report**, EPA/600/R-06/097, p. 1–115, 2006.

\_\_\_\_\_. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. **U.S. Environmental Protection Agency**, EPA/600/R-14/413b, p. 1–353, 2015.

STURM, T. **Open channel hydraulics**. New York: Mc Graw Hill, 2001.

TRAJKOVIC, B. et al. Investigation of transition from free surface to pressurized flow in a circular pipe. **Water Science and Technology**, v. 39, n. 9, p. 105–112, 1999.

VASCONCELOS, J. G.; WRIGHT, S. J. Comparison between the two-component pressure approach and current transient flow solvers. **Journal of Hydraulic Research**, v. 45, n. 2, p. 178–187, 2007.

VASCONCELOS, J. G.; WRIGHT, S. J. Geysering generated by large air pockets released through water-filled ventilation shafts. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 5, p. 543–555, 2011.

WRIGHT, S. J.; VASCONCELOS, J. G.; LEWIS, J. W. Air–water interactions in urban drainage systems. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering and Computational Mechanics**, p. 1–16, 24 ago. 2017.

ZHOU, F.; HICKS, F. E.; STEFFLER, P. M. Transient Flow in a Rapidly Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 6, p. 625–634, jun. 2002.

## APÊNDICES

## APÊNDICE 1 – PLANILHA DE CONTROLE DAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS

PLANILHA DE CONTROLE DE ENSAIOS												
Decividade da Saída 4 %	Linha Principal	Q1 = inteira (L/s)			Q1 = reduzida (L/s)			Q1 = 0,00 (L/s)				
		1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Linha Secundária	Declividades (%)											
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										
		1										
		2										
		3										

## APÊNDICE 2 – PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

Versão 1.2 – 02 de Julho de 2019

### A – Antes de ligar os sensores e as câmeras

- 1) Verificar e certificar-se que as declividades a serem utilizadas correspondem àquelas que devem ser testadas
  - a. Corrigir eventuais “envergamentos” ou “embarrigamentos” na declividade
  - b. Corrigir eventuais erros de alinhamento nos condutos
- 2) Encher o sistema (canal e reservatório de montante) com a bomba grande mas não deixar extravasar nas caixas de medição de vazão do aparato experimental
- 3) Usar a bomba menor à montante do canal (e/ou outras bombas menores associadas) para estabelecer as vazões a serem utilizadas
  - a. Certificar-se que a vazão, em L/s, chegando do canal principal está no valor correto usando o vertedor triangular através das equações:  

$$Q = 0,014 * (h_r - 44,0)^{2,5}$$
 para o **Vertedor 0**, onde  $h_r$  é a altura medida na régua, em cm;
    - b. Certificar-se que a vazão chegando e cada caixa de alimentação do aparato experimental está no valor desejado através das equações  

$$Q = 0,014 * (h_r - 38,3)^{2,5}$$
 para o **Vertedor 1**, onde  $h_r$  é a altura medida na régua, em cm;  

$$Q = 0,014 * (h_r - 38,8)^{2,5}$$
 para o **Vertedor 2**, onde  $h_r$  é a altura medida na régua, em cm;
- 4) TENHA EM MENTE QUE A CONSISTÊNCIA NA COLETA DE DADOS EXPERIMENTAIS É CRUCIAL
  - a. Repetição de condições experimentais precisam ser em condições idênticas
- 5) Para garantir que o escoamento está em condições permanente:
  - a. Não realizar experimentos com menos de 3 minutos de intervalo entre eles
  - b. Observar e ter certeza que na hora de iniciar o experimento (fechamento da válvula guilhotina) que as vazões nas caixas e nos tubos transparentes se encontram estacionárias

### B – Coletando dados – repetição sistemática

- 1) Após as vazões e declividades estiverem ajustadas,
  - a. Preparar os transdutores Arduino (não gravando). Ajustar para 10 Hz a leitura;
- 2) Fazer a leitura e escrever na folha de coleta de dados as seguintes informações:
  - a. Em cada tubo de transparente, ler o perímetro de ar no início, meio e no fim dos condutos com vistas a calcular o volume de ar;
  - b. No Tê de junção/PV, fazer a leitura do nível da água antes do ensaio iniciar seja com um manômetro digital ou com um piezômetro com uma régua.
- 3) Ligar a câmera e reportar as condições experimentais:
  - a. Reportar data, hora, e número do teste
  - b. Declividades trecho principal e lateral
  - c. Vazões no trecho principal e lateral
  - d. Repetição do teste, e qualquer outra observação relevante, tal como alguma coisa interessante ou inusitada observada durante os testes.

- 4) Iniciar a gravação dos transdutores Arduino, e falar alto “gravando” no momento após pressionar o botão de gravação, quando visualmente a gravação for observada na tela do computador
- 5) Fechar a válvula guilhotina (rapidamente) e falar alto “fechando” no momento que o fechamento começar
- 6) Observar o processo de enchimento
  - a. Acompanhar o avanço da frente de enchimento nos condutos transparentes.
  - b. Reportar para as câmeras o que está acontecendo
  - c. Observar se há ou não sinais de algum aprisionamento de bolsão de ar, que é algo a ser evitado
- 7) Deixar o enchimento progredir até chegar nas caixas de montante, e extravasar de maneira permanente nesse local. Dado que as vazões zeraram nos condutos, a carga piezométrica em todos os transdutores é a mesma. Assim, se for medida a elevação do sensor sobre o piso, obtém-se a pressão piezométrica para calibração das leituras dos sensores de pressão.
- 8) Nesse ponto executar rapidamente as seguintes tarefas
  - a. Ler e na pressão no t $\hat{e}$ /PV novamente
  - b. Desligar os transdutores, reportando para a câmara
  - c. Desligar a câmara
  - d. Abrir a válvula guilhotina
- 9) Deixar o sistema voltar ao estado de equilíbrio e repetir a medição.
- 10) Preencher a planilha de controle, marcando o fim do ensaio.

**APÊNDICE 3 – FORMULÁRIO DE COLETA DE DADOS****FORMULÁRIO DE COLETA DE DADOS**

Versão 1.1 – 02 julho de 2019

NÚMERO DO ENSAIO: \_\_\_\_\_

Medição:  Primeira

DATA E HORA: \_\_\_\_\_

 Segunda

RÚBRICA RESPONSÁVEL: \_\_\_\_\_

 Terceira

## CONDIÇÕES DO ENSAIO:

VERTEDOR TRIANGULAR CANAL (cm): \_\_\_\_\_

VERTEDOR TRIANGULAR DO TRECHO PRINCIPAL (cm): \_\_\_\_\_

VERTEDOR TRIANGULAR DO TRECHO LATERAL (cm): \_\_\_\_\_

DECLIVIDADE DO TRECHO PRINCIPAL (%): \_\_\_\_\_

DECLIVIDADE DO TRECHO LATERAL (%): \_\_\_\_\_

LEITURA INICIAL DA CARGA PIEZOMÉTRICA DA JUNÇÃO (cm): \_\_\_\_\_

LEITURA FINAL DA CARGA PIEZOMÉTRICA DA JUNÇÃO (cm): \_\_\_\_\_

## QUANTIFICAÇÃO DE AR PRÓXIMO À JUNÇÃO: LEITURA DO PERÍMETRO DE AR

TRECHO	PERIM. AR JUSANTE	PERIM. AR MEDIO	PERIM. AR MONTANTE
PRINCIPAL JUSANTE			
PRINCIPAL MONTANTE			
LATERAL MONTANTE			

## ALTURA DOS SENSORES DE PRESSÃO ACIMA DO PISO DO LABORATORIO

Local do Sensor	Knife gate	Tê/Junção	Trecho principal 1	Trecho principal 2	Trecho lateral 1	Trecho lateral 2
Elevação do sensor (m)						

## OBSERVAÇÕES ACERCA DO ENSAIO:

---



---



---



---