

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA SOBRE
INTERAÇÕES ENTRE AR E ÁGUA DURANTE O ENCHIMENTO DE
ADUTORAS**

FRANCISCA DARIANA GONÇALVES LIMA

ORIENTADOR: JOSÉ GOES VASCONCELOS NETO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO, 2012.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA SOBRE
INTERAÇÕES ENTRE AR E ÁGUA DURANTE O ENCHIMENTO DE
ADUTORAS**

FRANCISCA DARIANA GONÇALVES LIMA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

Prof. Sérgio Koide, PhD. (ENC- UnB)

(Examinador Interno – Presidente da Banca)

Prof. Dirceu Reis Silveira Júnior, PhD. (ENC- UnB)

(Examinador Interno)

Prof. Alexandre Kepler Soares, PhD. (EEC-UFG)

(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 18 DE DEZEMBRO, 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, FRANCISCA DARIANA GONÇALVES

Investigação Experimental e Numérica Sobre Interações Entre Ar e Água Durante o Enchimento de Adutoras.

xii, 119p., 210×297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2012). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|----------------------------|---------------------------------|
| 1. Adução de água | 2. Escoamento bifásico |
| 3. Modelagem Computacional | 4. Eliminação do ar em adutoras |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, F. D. G. (2012). Investigação Experimental e Numérica Sobre Interações Entre Ar e Água Durante o Enchimento de Adutoras. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Publicação PTARH.DM-145/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 119p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Francisca Dariana Gonçalves Lima.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Investigação Experimental e Numérica Sobre Interações Entre Ar e Água Durante o Enchimento de Adutoras.

GRAU/ ANO: Mestre/ 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente com propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Francisca Dariana Gonçalves Lima
Quadra 412 Conjunto 17 casa 11
Samambaia, Brasília - DF – CEP: 72320-119.
dariana.lima@yahoo.com.br

Dedico minha dissertação ao Pai, Filho e Espírito Santo.
Aos meus queridos pais Ana e Miguel,
e aos meus amigos e irmãos que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter sempre me abençoado.

Sou grata aos meus pais Ana e Miguel, ao meu irmão Jhonatan e aos meus amigos e colegas que me encorajaram nessa jornada.

Ao professor Goes, pela orientação e paciência, sempre disposto a ajudar. Sua dedicação é contagiante, o admiro e sou imensamente grata por ter me concedido essa oportunidade de pesquisa, além de, também, compartilhar seu saber nas disciplinas ministradas quando ainda estava no Brasil.

Ao professor Koide, pela paciência, apoio, orientação, incentivo desde minha admissão no PTARH. Agradeço pela oportunidade de ter sido sua aluna e de ter aprendido tanto em sala de aula, quanto fora dela. Agradeço também pelas recomendações a essa pesquisa.

Aos professores Alexandre Kepler e Dirceu pelas valiosas contribuições para melhoria deste trabalho.

Aos professores do PTARH, pelos conhecimentos transmitidos com dedicação, dentro e fora de sala de aula.

Aos meus amigos Bernardo Trindade, Nayara Rodrigues, Prof. Yovanka, Glenda Feitosa e Shirley Trigueiro que me auxiliaram de forma muito especial.

RESUMO

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA SOBRE INTERAÇÕES ENTRE AR E ÁGUA DURANTE O ENCHIMENTO DE ADUTORAS

Autor: Francisca Dariana Gonçalves Lima

Orientador: José Goes Vasconcelos Neto

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, dezembro de 2012

Uma das necessidades da infraestrutura urbana é o transporte de água a grandes distâncias. Esse transporte de água ocorre por meio de adutoras, que são geralmente projetadas assumindo um escoamento permanente, uniforme, monofásico e unidimensional. Na prática, esses escoamentos são por vezes transientes e com presença de ar no formato de bolhas ou bolsões alterando toda a dinâmica do escoamento. O conhecimento do comportamento hidráulico dessas adutoras nessas condições torna-se necessário para se evitar acidentes tais como rupturas catastróficas ou colapsos. Nesse contexto, esta pesquisa teve por objetivo o estudo das interações entre a interface ar e água, durante o enchimento de uma adutora em escala de laboratório, para o levantamento de dados experimentais e a respectiva comparação com simulações de dois modelos matemáticos. O primeiro, desenvolvido por Vasconcelos (2007), usa técnicas numéricas em dinâmica dos fluidos computacional numa formulação transiente, permitindo simular transições entre regimes de escoamento bem como a formação de ondas de choque com o mínimo de difusão numérica. O segundo, desenvolvido por Leite (2009), é um modelo numérico para enchimento gradual de adutoras, que considera uma interface de enchimento mais realista e a pressurização do ar. Os resultados experimentais permitiram observar que a diminuição da área do orifício instalado para ventilação é capaz de aumentar o tempo necessário para eliminação do ar, em até 10%, e para o enchimento da adutora, cerca de 13%. Os resultados das simulações numéricas apresentaram, de maneira geral, que quanto à magnitude de alguns parâmetros avaliados a predição não foi satisfatória, porém a previsão de tempo para os principais eventos associados ao enchimento apresentou uma boa concordância com os valores experimentais.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON INTERACTIONS BETWEEN AIR AND WATER DURING THE FILLING PIPELINES

Author: Francisca Dariana Gonçalves Lima

Supervisor: José Goes Vasconcelos Neto

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, December of 2012

One of the needs of urban infrastructure is conveying water over long distances. This transport usually occurs through pipelines, which are designed assuming a steady, single-phase flow conditions. In practice, some of these flows can be transient and contain air bubbles or pockets, particularly during pipeline filling operations. Knowledge of the hydraulic behavior of pipelines under these conditions it is necessary to avoid catastrophic accidents such as rupture or collapse. This research aimed to study the interactions between air and water phases during the filling of a pipeline in a laboratory scale. Experimental data was gathered and compared with the results of two numerical models. The first model, developed by Vasconcelos (2007), uses contemporary numerical techniques to simulate transitions between flow regimes as well as the formation of shock waves with minimal numerical diffusion. The second developed by Leite (2009) simulates gradual filling of pipelines and considers a more realistically air pressurization effects. The experimental results showed that decreasing the size of the ventilation orifice can increase the time needed for elimination of air up to 10%, and total filling time up to about 13%. The results of numerical simulations showed, in general, a good agreement of timing of key events associated with the gradual filling of the laboratory-scale pipeline.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
3.1	MECANISMOS DE ADMISSÃO DE AR EM ADUTORAS.....	4
3.2	CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM CONDUTOS FECHADOS.....	8
3.3	INTERAÇÕES AR-ÁGUA EM CONDUTOS FECHADOS	11
3.4	MECANISMOS DE REMOÇÃO DE AR EM ADUTORAS	18
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
4.1	MOVIMENTO DE BOLSÕES DE AR NO REGIME PRESSURIZADO EM ADUTORAS	23
4.2	MODELAGEM NUMÉRICA DO ENCHIMENTO DE CONDUTOS FECHADOS	
	30	
5	METODOLOGIA	46
5.1	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	46
5.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	48
5.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
6.1.1	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$:</i>	54
6.1.2	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,30$ e $D^* = 0,18$:</i>	56
6.1.3	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$:</i>	58
6.1.4	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$:</i>	61
6.1.5	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$:</i>	64
6.1.6	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$:</i>	66
6.1.7	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$:</i>	69
6.1.8	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$:</i>	71
6.1.9	<i>Ensaio experimental com $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$:</i>	74
6.1.10	<i>Ensaio experimentais, observações gerais:</i>	77
6.2	COMPARAÇÃO COM MODELOS NUMÉRICOS	82
6.2.1	<i>Eventos relevantes no processo de enchimento:</i>	83
6.2.2	<i>Comparação entre valores medidos e previstos de pressão do ar:</i>	91
6.2.3	<i>Comparação das hidrógrafas de pressão medidas e previstas:</i>	94

7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

TABELAS

Tabela 4.1: Padrões de pressão para diferentes tamanhos de orifício. Adaptado de Zhou <i>et al.</i> (2002)	36
Tabela 4.2: Faixa das condições experimentais. Adaptado de Guizani <i>et al.</i> (2005).....	37
Tabela 5.1: Arranjo experimental.	49
Tabela 5.2: Arranjo experimental com valores adimensionais.....	49
Tabela 5.3: Parâmetros de entrada para o modelo AduTrans.....	51
Tabela 5.4: Parâmetros de entrada para o modelo de Leite (2009).	52
Tabela 6.1: Vazão do ar pelo orifício da torre de ventilação.....	80
Tabela 6.2: Vazão de água no regime permanente.....	90
Tabela 6.3: Vazão do ar pelo orifício da torre de ventilação.....	93

FIGURAS

Figura 1.1: Colapso em trecho de adutora de abastecimento de água. <i>Fonte: Haper International (2009)</i>	1
Figura 3.1: Entrada de ar devido à subpressões.....	5
Figura 3.2: Entrada de ar na adução de água. Adaptado de Falvey (1980).	5
Figura 3.3: Entrada de ar em sistemas com vazão reduzida.....	6
Figura 3.4: Entrada de ar em sistemas com vazão reduzida. Adaptado de Quintela, 1981...	7
Figura 3.5: escoamento vertical bifásico. Adaptado de Wallis (1969).	8
Figura 3.6: escoamento horizontal bifásico Adaptado de Collier (1973, <i>apud</i> Estrada, 2007).	9
Figura 3.7: Carga piezométrica e velocidade do escoamento <i>versus</i> tempo. Adaptado de Wylie & Streeter (1983).	13
Figura 3.8 Condições antes e depois do colapso da bolsa de ar. Adaptado de Lingireddy (2004).	14
Figura 3.9 Pressão após expulsão do ar para diferentes tamanhos de orifício. Adaptado de Lingireddy <i>et al.</i> (2004).	16
Figura 3.10: Incorporação de ar pelo ressalto hidráulico. Adaptado de Estrada (2007).	17
Figura 3.11: Curva da bomba hidráulica e curva do sistema.	17
Figura 3.12: Curva de rendimento da bomba.	17
Figura 4.1. Dados experimentais apresentando a relação entre a declividade da tubulação, o diâmetro da tubulação, a vazão de água e o gradiente hidráulico, quando se inicia a remoção de ar (Adaptado de Kalinske & Bliss, 1943).	24
Figura 4.2. Correlação de dados sobre a taxa de ar removido pelo ressalto hidráulico (Adaptado de Kalinske & Robertson, 1943).	25
Figura 4.3. Valores experimentais para o número de Froude crítico a jusante do ressalto hidráulico (Adaptado de Kalinske & Robertson, 1943).	26
Figura 4.4. Relação da velocidade mínima com a declividade (Adaptado de Kent, 1952).	27
Figura 4.5. Taxas de escoamento necessárias para o transporte de bolhas e bolsões de ar (Adaptado de Falvey, 1980).	29
Figura 4.6. Desenho esquemático do aparato experimental - enchimento de adutoras. Adaptado de Liou e Hunt (1996).	31
Figura 4.7: Comparação entre resultados teóricos e experimentais. Adaptado de Liou e Hunt (1996).	32

Figura 4.8: Perfil da adutora simulada. Adaptado de Izquierdo (1999).	33
Figura 4.9: Esquematização do aparato experimental. Adaptado de Zhou <i>et al.</i> (2002).....	35
Figura 4.10: Desenho esquemático. Adaptado de Guizani <i>et al.</i> (2005).....	37
Figura 4.11: Perfil da frente de enchimento para $H/D = 9,2$ com adutora na horizontal. Adaptado de Guizani <i>et al.</i> (2005).....	38
Figura 4.12: Trajetória da frente de enchimento. Adaptado de Guizani <i>et al.</i> (2005).....	38
Figura 4.13: Pressão transiente gravado durante experimentos com súbita abertura da válvula, relativa a $H/D = 9,2$. Adaptado de Guizani <i>et al.</i> (2005).....	39
Figura 4.14: Representação do aparato experimental. Adaptado de Vasconcelos e Wright (2008).	40
Figura 4.15: Visualização esquemática da intrusão do ar. Adaptado de Vasconcelos e Wright (2008).	40
Figura 4.16: Velocidade absoluta do fluxo (U) no ponto $X=0,262\text{m}$ comparada com a velocidade de intrusão do ar (c_{ar}).....	41
Figura 4.17: Velocidade absoluta do fluxo (U) no ponto $X = 0,262\text{m}$ comparada com a velocidade de intrusão do ar (c_{ar}). Para $H/D:1,38; 1,60$ e $1,81$	41
Figura 4.18: Configuração da adutora apresentada pela interface do modelo desenvolvido por Vasconcelos (2007).	43
Figura 4.19: Simulação de enchimento da adutora no instante $T = 581,54$ s na interface do modelo desenvolvido por Vasconcelos (2007).....	44
Figura 5.1: Instalações do Laboratório de Hidráulica – UnB.....	46
Figura 5.2: Bancada experimental instalada no Laboratório de Hidráulica – UnB. Escala 1:77.	46
Figura 6.1: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$	55
Figura 6.2: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$	55
Figura 6.3: Medições do ADV- $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$	56
Figura 6.4: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,18$	57
Figura 6.5: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,18$	58
Figura 6.6: Medições do ADV- $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,18$	58
Figura 6.7: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$	59
Figura 6.8: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$	60
Figura 6.9: Medições do ADV- $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$	61
Figura 6.10: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$	62
Figura 6.11: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$	63

Figura 6.12: Medições do ADV- $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$	64
Figura 6.13: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$	65
Figura 6.14: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$	65
Figura 6.15: Medições do ADV- $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$	66
Figura 6.16: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$	67
Figura 6.17: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$	67
Figura 6.18: Medições do ADV- $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$	68
Figura 6.19: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$	70
Figura 6.20: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$	70
Figura 6.21: Medições do ADV- $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$	71
Figura 6.22: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$	72
Figura 6.23: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$	72
Figura 6.24: Medições do ADV- $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$	73
Figura 6.25: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$	75
Figura 6.26: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$	75
Figura 6.27: Medições do ADV- $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$	76
Figura 6.28: Representação esquemática vista da parte superior do conduto de um ressalto hidráulico e do <i>slug flow</i> . (a)ressalto e bolhas trafegando para jusante; (b) bolhas estacionadas; (c) aderência de bolhas e <i>slug flow</i> trafegando para montante; (d) <i>slug flow</i> encontrando o ressalto hidráulico.	78
Figura 6.29: Fotografias e representação gráfica do <i>slug flow</i>	79
Figura 6.30: Gráfico D_o^* versus Q_{ar}^*	80
Figura 6.31: Diâmetro do orifício versus tempo para enchimento – (a)Adimensional e (b)Dimensional.	81
Figura 6.32: Pressurização média do ar versus tempo para eliminação do ar na linha. – (a)Adimensional e (b)Dimensional.	82
Figura 6.33: Predição numérica e dados experimentais referente à pressurização para as vazões $Q^* = 0,30$; $0,20$ e $0,10$	83
Figura 6.34: Predição numérica e dados experimentais referente à eliminação do ar para as vazões $Q^* = 0,10$; $0,20$ e $0,30$	85
Figura 6.35: Predição numérica e dados experimentais referente ao extravasamento para as vazões $Q^* = 0,10$; $0,20$ e $0,30$	87
Figura 6.36: Predição numérica e dados experimentais referente ao regime permanente para as vazões $Q^* = 0,10$; $0,20$ e $0,30$	89

Figura 6.37: Predição numérica e dados experimentais referente a pressurização média do ar para as vazões $Q^* = 0,10, 0,20$ e $0,30$. Erro padrão de $\Delta\bar{x} = \pm 0,04$	92
Figura 6.38: Predição numérica e valor calculado a partir de dados experimentais referente a vazão média do ar com vazões de $Q^* = 0,30, 0,20$ e $0,10$	93
Figura 6.39: Dados experimentais e numéricos $Q^* = 0,30, D^* = 0,27$ de montante e jusante.....	94
Figura 6.40: Dados experimentais e numéricos $Q^* = 0,20, D^* = 0,27$ de montante e jusante.....	95
Figura 6.41: Dados experimentais e numéricos $Q^* = 0,10, D^* = 0,27$ de montante e jusante.....	95
Figura 6.42: Dados experimentais e numéricos de jusante com $Q^* = 0,30, D^* = 0,18$ e $D^* = 0,09$	96
Figura 6.43: Dados experimentais e numéricos de jusante com $Q^* = 0,20, D^* = 0,18$ e $D^* = 0,09$	97
Figura 6.44: Dados experimentais e numéricos de jusante com $Q^* = 0,10, D^* = 0,18$ e $D^* = 0,09$	97

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.

a	Velocidade da onda acústica
A	Área da seção do escoamento
A_c	Área do conduto
$AWWA$	<i>American Water Works Association</i>
ADV	<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>
A_o	Área do orifício
C	Celeridade da onda acústica
c_{ar}	Celeridade da intrusão do ar
C_d	Coefficiente de descarga
C_0	Constante em função do formato do bolsão de ar
D	Diâmetro da tubulação
d_p	Diâmetro do conduto
d_o, D_o	Diâmetro do orifício
f	Coefficiente de fricção; fator de atrito
F_1	Número de Froude a montante do ressalto
FT	Faculdade de Tecnologia
g	Aceleração da gravidade
h	Carga de pressão
H	Carga de pressão; cota de linha piezométrica
H^*	Pressão absoluta do ar
H_b	Pressão absoluta inicial do ar
ΔH	Pressão transiente potencial.
H_A	Pressão do ar
h_c	Profundidade do centróide da seção
k	Expoente politrópico
L	Comprimento da tubulação
L_e	Comprimento da coluna de enchimento
LH	Laboratório de Hidráulica
L_{min}	Comprimento da coluna de enchimento
LP	Linha Piezométrica
$m.c.a.$	Metros de coluna d'água

n	Coeficiente politrópico
n_a	Volume do bolsão de ar
n_m	Coeficiente de rugosidade de Manning
P	Perímetro molhado
P_o	Pressão a jusante da válvula
p_0^*	Pressão de montante no conduto
p_1^*	pressão do bolsão de ar
Q	Vazão volumétrica
Q_A, Q_{ar}	Vazão volumétrica de ar
Q_w	Vazão volumétrica de água
S	Declividade do conduto
S_o	Declividade do leito do canal
S_f	Declividade da linha de energia
t, T	Tempo
UnB	Universidade de Brasília
V	Velocidade média do escoamento
V_a	Volume de ar
v_c	Velocidade crítica
v_{min}	Velocidade mínima de remoção
Vol_l	Volume de ar
x, X	Coordenada espacial
Y	Fator de estrangulamento
z	Cota geométrica
α	Fração de vazios
Δz	Diferença de cota geométrica
$\Delta \bar{x}$	Erro padrão
η	Rendimento
θ	Ângulo de inclinação do conduto
ρ, ρ_w	Massa específica da água
ρ_a	Massa específica do ar
ϕ	Ângulo entre o centro do conduto a superfície do escoamento

1 INTRODUÇÃO

Uma das necessidades da infraestrutura urbana é o transporte de água a grandes distâncias. Tal transporte de água bruta ou tratada ocorre geralmente por meio de adutoras, condutos com seção transversal fechada e pressão interna geralmente superior à atmosférica, onde o fluxo do fluido é orientado pela diferença de energia. O transporte pode ocorrer por gravidade, quando as condições topográficas permitem a vazão desejada, ou então por recalque, em casos onde há necessidade de se vencer desníveis ou perdas de energia ao longo da extensão da adutora, utilizando um sistema de bombeamento.

As adutoras são geralmente projetadas assumindo um escoamento permanente, uniforme, monofásico e unidimensional. O que se observa na prática, é que esses escoamentos são, ocasionalmente, transientes e quase sempre possuem ar dissolvido na forma de bolhas ou bolsões, podendo caracterizar um escoamento bifásico. Esses escoamentos tendem a ocorrer de uma forma muito distinta da preconizada no projeto, podendo resultar em problemas operacionais. O conhecimento do comportamento hidráulico dessas adutoras nessas condições torna-se necessário para se evitar acidentes associados às sobrepressões como rupturas ou às subpressões como colapsos. Um exemplo de acidente em adutoras é apresentado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Colapso em trecho de adutora de abastecimento de água. *Fonte: Haper International (2009).*

O projeto e, particularmente, as atividades de operação e manutenção de adutoras requerem cuidados específicos, como por exemplo, evitar a entrada ou acumulação de ar. O enchimento de uma adutora, seja no caso da sua primeira utilização, ou pelo esvaziamento para manutenção, requer precauções devido à possibilidade de formação de bolsões de ar. Caso o sistema possua uma ventilação precária, a compressão desses bolsões poderá gerar pressões excessivas podendo causar danos aos condutos e acessórios. Além disso, a presença desses bolsões de ar pode acarretar também em um acréscimo na perda de carga diminuindo a eficiência do sistema, uma vez que o ar pode consistir numa barreira ao escoamento tal como uma válvula parcialmente fechada. Esse fator, geralmente, repercute no acréscimo de tempo necessário para completar a operação de enchimento, despendendo mais recursos, o que é claramente desvantajoso para as companhias de saneamento.

Para remediar alguns desses problemas, em projetos de adutoras incluem-se válvulas de admissão e eliminação de ar, distribuídas segundo experiências e conhecimento prático, tal como as recomendações apresentadas pelo manual da *American Water Works Association* (AWWA, 2004). Contudo, a variedade de geometrias e perfis longitudinais que as adutoras apresentam não é completamente representada nessas recomendações. Uma alternativa para previsão da localização de bolsões de ar seria o uso de modelos matemáticos para enchimento de adutoras (Liou e Hunt, 1996; Vasconcelos, 2007). Ademais, a grande maioria dos modelos matemáticos não inclui efeitos do ar aprisionado no processo de enchimento e os modelos que incluem tais efeitos o fazem de maneira limitada, uma vez que não existe ainda uma completa ideia das interações entre ar e água em tais escoamentos transientes. Como consequência, a tentativa de projetistas em criarem projetos não enfatizando devidamente problemas no que tange ao aprisionamento de bolsões durante enchimentos, resulta em problemas operacionais aumentando os riscos a acidentes, bem como o desperdícios de recursos.

Nesse contexto, o estudo das interações entre as fases ar e a água em adutoras torna-se relevante, uma vez que o levantamento de dados experimentais visa subsidiar critérios e ferramentas para melhor entender o dimensionamento de ventosas que minimizem os efeitos danosos da presença de bolsões de ar em escoamentos. Os dados experimentais permitem também, avaliar a qualidade da predição de alguns modelos matemáticos, que também visam auxiliar o dimensionamento e adequação de adutoras.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação das interações entre as interfaces ar e água no processo de eliminação de ar durante eventos de enchimentos em adutoras. A motivação para esse estudo é a falta de informações sobre esses eventos o que leva a incertezas no projeto e nas simulações numéricas. Nesse propósito, foram realizadas investigações em escala experimental num conduto de acrílico instalado no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília LH/ FT/ UnB.

Os objetivos específicos do trabalho compreendem:

- Avaliação do efeito da presença de ar e sua eliminação através de diferentes graus de ventilação no enchimento da adutora.
- Observação e descrição das interações entre ar e água na adutora para diferentes vazões e diferentes graus de ventilação admitidos no sistema.
- Comparação dos resultados experimentais com predições de modelos numéricos de simulação para enchimento de adutora.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Em diversas instâncias, adutoras apresentam condições operacionais que são adversamente afetadas pela presença de ar nos condutos. A redução na vazão e as sobrepressões causadas pela compressão do ar encontram-se entre os problemas mais comuns. O conhecimento das interações entre ar e água em condutos fechados por meio de experimentos é considerado fundamental para o desenvolvimento de modelos numéricos adaptados ao problema de escoamentos em adutoras e enchimento de condutos. Atualmente, há ainda poucos estudos avaliando os efeitos da presença do ar em escoamentos bifásicos, em sistemas existentes, mas essa área vem recebendo maior ênfase com abordagens experimentais e modelagem numérica. O intuito é subsidiar projetos e operação de redes, minimizando os efeitos adversos da presença do ar.

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica do presente trabalho, estruturado em: 1) Mecanismos de admissão de ar em adutoras; 2) Classificação de escoamentos bifásicos em condutos fechados; 3) Interações ar-água em condutos fechados; 4) Mecanismos de remoção de ar em adutoras.

3.1 MECANISMOS DE ADMISSÃO DE AR EM ADUTORAS

Falvey (1980) e Estrada (2007) indicam que as principais causas que levam a admissão de ar no escoamento em adutoras devem-se ao:

- Esvaziamento decorrente da manutenção, situação em que o ar é admitido por válvulas quebra vácuo ou ventosas de tríplice função;
- Subpressões em pontos localizados nas adutoras associadas às falhas de estanqueidade (Figura 3.1);

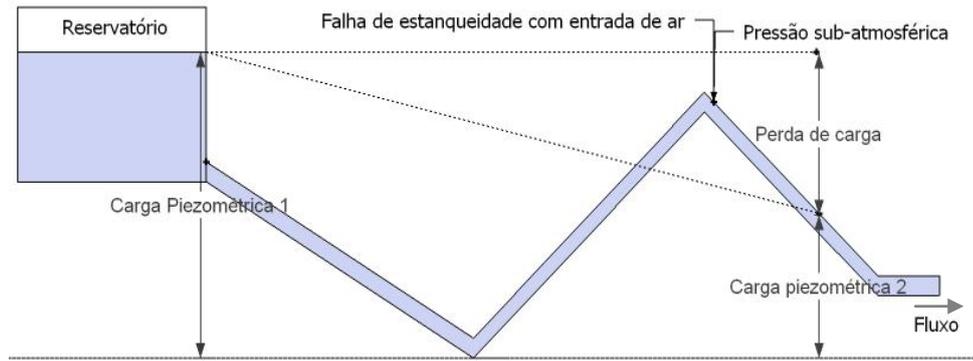


Figura 3.1: Entrada de ar devido à subpressões.

- Admissão com vórtices na sucção: Falvey (1980) apresenta duas situações onde o ar é admitido em sistemas de adução a partir de tomadas de água verticais. Quando o nível de água é baixo, o escoamento ocorre por uma fina lâmina junto à parede do conduto vertical (Figura 3.2a). O volume do fluxo de ar é determinado, principalmente, pela ação de cisalhamento entre a interface ar-água e pela incorporação desse ar à massa de água. Já a um nível maior de água no reservatório (Figura 3.2b), a lâmina torna-se mais espessa, podendo formar vórtices com um núcleo de ar. Para valores ainda maiores dessa referida carga, tais vórtices tenderiam a desaparecer;

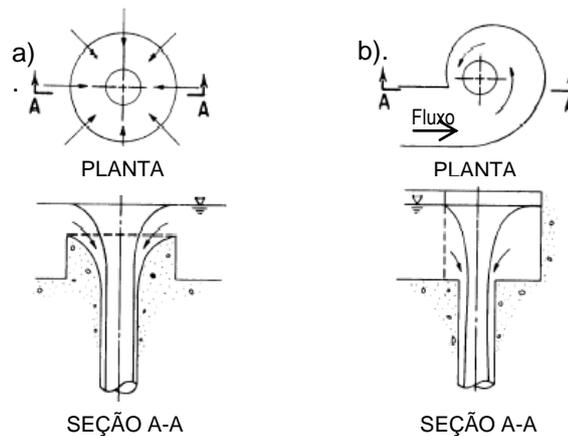


Figura 3.2: Entrada de ar na adução de água. Adaptado de Falvey (1980).

- Escoamento com vazão inferior ao valor projetado: Em casos em que a vazão de escoamento é bem inferior à projetada, é possível que ocorra escoamento em regime livre em determinados trechos de adutoras (Figura 3.3). No momento do enchimento do conduto, caso ocorra deficiência de ventilação por meio de ventosas e válvulas, o ar tenderá a ficar em pontos altos sob a forma de bolsões causando problemas operacionais (Estrada, 2007).

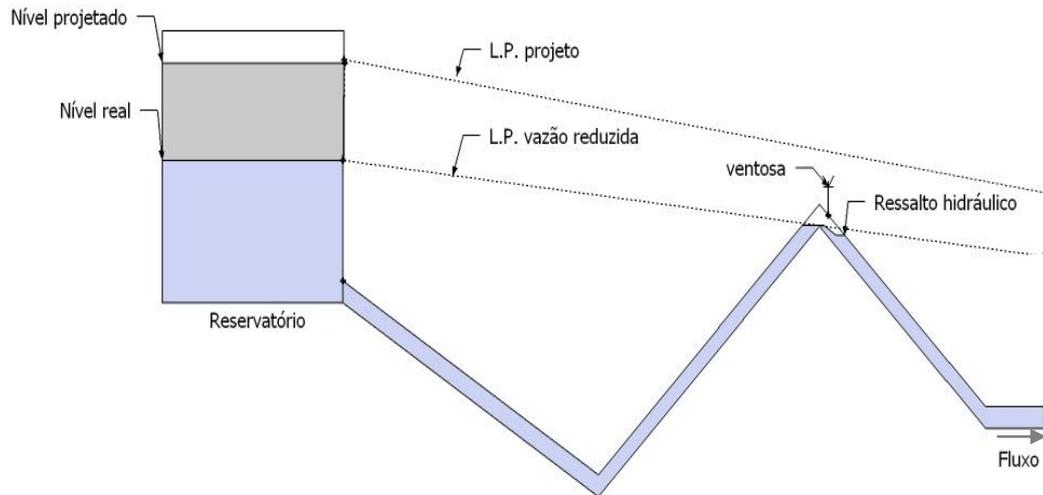


Figura 3.3: Entrada de ar em sistemas com vazão reduzida.

- Ressalto hidráulico: Fenômeno caracterizado por uma elevação brusca no nível da lâmina de água, em uma curta distância, com instabilidade na superfície propiciando ondulações. A agitação da massa de água favorece a entrada de ar no escoamento propiciando a formação de bolhas (Porto, 2004).

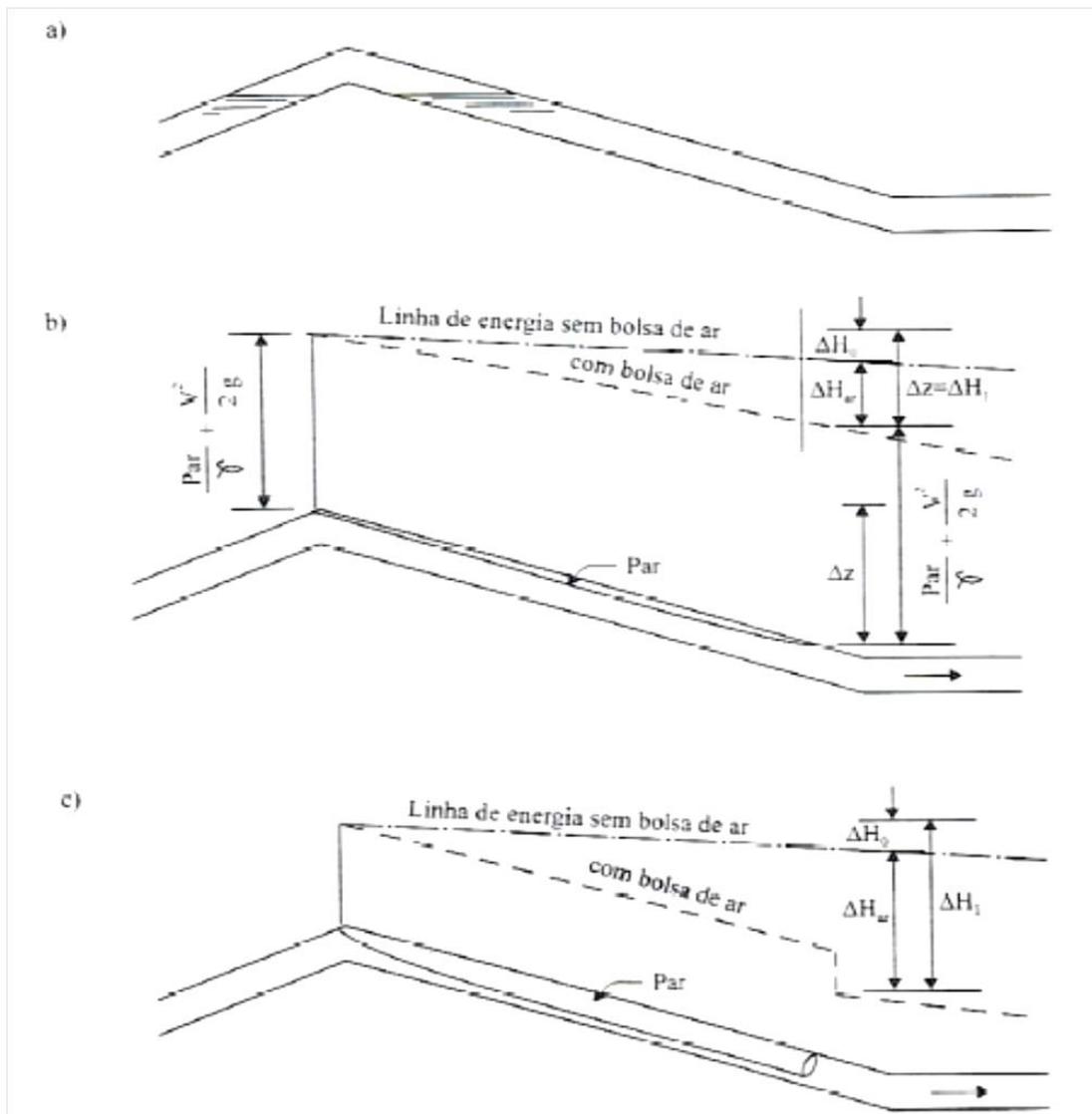


Figura 3.4: Entrada de ar em sistemas com vazão reduzida. Adaptado de Quintela, 1981.

A Figura 3.4a apresenta a água em repouso e o ar aprisionado em um ponto alto. Iniciando um escoamento, este ocorreria em regime livre e o ar ficaria a pressão atmosférica. Na Figura 3.4b a passagem para o escoamento pressurizado acontece pelo aumento gradual da altura da lâmina de água. A passagem também poderá ocorrer bruscamente por meio do ressalto hidráulico, como ilustrado na Figura 3.4 (c) (Quintela, 1981).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM CONDUTOS FECHADOS

Parte da definição do tipo de escoamento é descrito pelo arranjo morfológico das componentes (geralmente a partir de padrões visuais) não sendo suficiente, em alguns casos, para definir completamente o regime – como por exemplo, a diferença entre escoamento monofásico laminar e turbulento. Porém, para escoamentos bifásicos é mais simples restringir-se a classificações morfológicas e nessas classes criar novas subdivisões em regimes distintos (Wallis, 1969). Autores como Wallis (1969), Falvey (1980) e Estrada (2007) têm apresentado os padrões de fluxo e regimes para escoamento bifásico. Tais divisões são apresentadas na Figura 3.5 para escoamento vertical bifásico e na Figura 3.6 para escoamento horizontal bifásico.

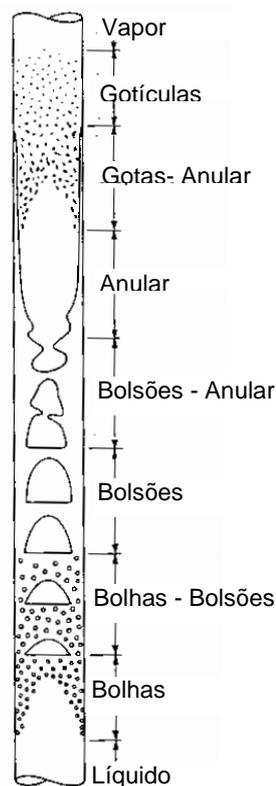


Figura 3.5: Escoamento vertical bifásico. Adaptado de Wallis (1969).

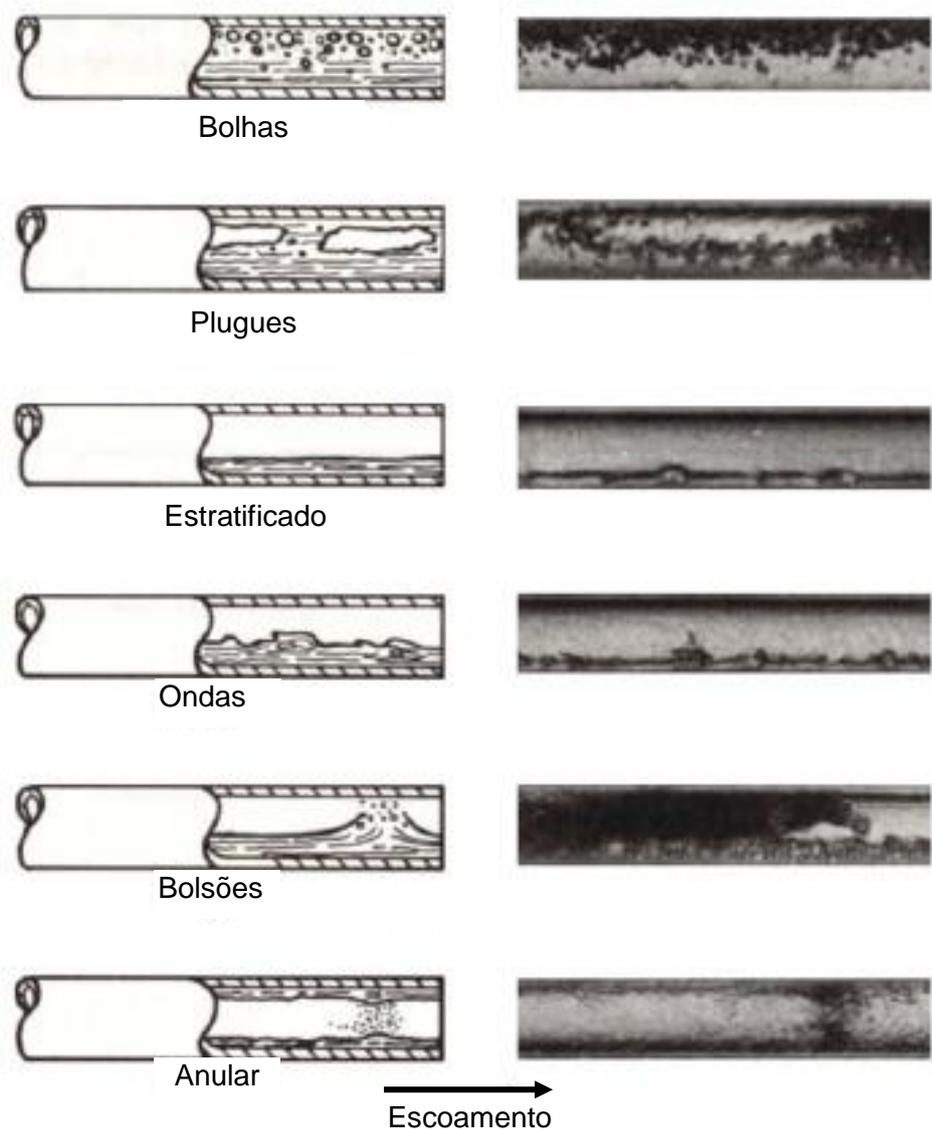


Figura 3.6: Escoamento horizontal bifásico Adaptado de Collier (1973, *apud* Estrada, 2007).

Ainda de acordo com Wallis (1969), as interações entre as forças que são devidas à tensão superficial, viscosidade, inércia e flutuação produzem uma variedade de efeitos que são muitas vezes evidenciados por diferentes formatos e trajetórias de bolhas no escoamento. Portanto, a presença de ar, conforme sua morfologia, em escoamentos bifásicos com água recebe geralmente as principais denominações:

- **Bolhas (*bubbles*):** são pequenas cápsulas elipsoidais proveniente do escoamento turbulento tal como sua inserção pelo ressalto hidráulico. Há certa variação na literatura no que tange à definição de bolhas. Wisner, *et al.* (1975) cita que as dimensões variam entre 1 mm a 5 mm. Já Kent (1952, *apud* Estrada, 2007) define como bolhas as cápsulas

menores que 6 mm. Estrada (2007) adota como bolhas (em escoamentos quase horizontais) cápsulas de ar com dimensão longitudinal menor ou igual ao diâmetro da seção de escoamento;

- Bolhas alongadas (Shoham, 1982 *apud* Estrada, 2007) (*plugs/ elongated bubble*): esse formato deve-se ao aumento das bolhas pelo incremento de ar ou por coalescência de bolhas menores (Estrada, 2007; Falvey, 1980);
- Bolsões (*slug / air pockets*): cápsulas de ar com comprimento maior que o diâmetro da seção de escoamento (Estrada, 2007; Wallis, 1969) ou conforme Falvey (1980), quando o diâmetro da bolha torna-se maior que a metade do diâmetro do conduto.

Os escoamentos bifásicos horizontais e inclinados, que são o foco deste trabalho, recebem as seguintes classificações para seus padrões de escoamento:

- Escoamento com bolhas (*bubbly flow*): caracteriza-se pelo fluxo de água com pequenas bolhas esféricas distribuídas;
- Escoamento com bolhas alongadas (*plug flow*): bolhas maiores escoam na metade superior do conduto em escoamentos horizontais (Falvey, 1980). Para escoamento vertical essas bolhas maiores encontram-se ao centro da tubulação;
- Escoamento suave estratificado: específico de escoamentos horizontais, onde se observa separação gravitacional das fases líquida e gasosa com escoamento contínuo de cada fase;
- Escoamento ondulante estratificado: com o aumento da velocidade do ar, ocorrem instabilidades do tipo Kevin-Helmholtz na superfície líquida. O movimento da superfície livre que separa os dois fluidos cisalhantes é controlado dinamicamente pelos efeitos da tensão superficial e da viscosidade. (Li & McCoequodale, 1999). Em outras palavras, a turbulência acontece quando uma camada de fluido em movimento desloca-se sobre outra mais lenta e mais viscosa, arrastando sua superfície;
- Escoamento em golfadas (*Slug flow*): a instabilidade da superfície gera ondas com amplitude suficiente para fechar a seção de escoamento, seguindo um padrão intermitente onde o bolsão de ar está preso entre pistões de água. Em escoamentos horizontais o bolsão de ar encontra-se na parte superior do conduto, enquanto em escoamentos verticais posiciona-se de forma concêntrica (Wallis, 1969);

- Escoamento anular (*annular flow*): ocorre um considerável acréscimo na velocidade do ar resultando na formação de um núcleo de gás revestido por uma fina camada de água (Estrada, 2007);
- Escoamento pulverizado: a vazão do ar é maior e a água é transportada na forma de gotículas e vapor (Falvey, 1980).

A transição entre o escoamento com bolhas para escoamento com bolsões foi caracterizado por Martin (1976, *apud* Falvey, 1980) e ocorre quando a fração de vazio é entre 19% e 23%. A fração de vazio é razão do volume médio do ar pelo volume de água no conduto (supondo um escoamento uniforme).

$$\alpha = \frac{Vol_l}{A_c L} \quad (3.1)$$

- α fração de vazios
- Vol_l volume de ar
- A_c área do conduto
- L comprimento do conduto

3.3 INTERAÇÕES AR-ÁGUA EM CONDUTOS FECHADOS

Como mencionado, a presença de ar em escoamento nas adutoras, caso a ventilação seja insuficiente, poderá causar efeitos indesejados.

Entre diversos problemas, pode-se citar a redução da seção transversal causada por bolsões de ar no escoamento provocando perdas de cargas adicionais. Tais problemas ocorrem frequentemente, mesmo em condutos recentemente construídos, devido à falta de cuidados na concepção do projeto, na operação ou na manutenção (Estrada, 2007). Segundo Lauchlan *et al.* (2005), outros efeitos da presença do ar são:

- Aumento da concentração de oxigênio dissolvido, podendo interferir no processo de corrosão da parede do conduto;
- Em razão da sua mistura com a água, alterar as propriedades do fluido, principalmente a densidade e a elasticidade;
- Em formato de bolha ou bolsão, introduz momento vertical no escoamento devido à sua fluutuabilidade, podendo assim causar efeitos significativos no escoamento;
- Pode causar leituras falsas em aparelhos de medição;

- Vibrações causadas pela transição dos regimes de escoamento (livre / pressurizado);
- Vibrações causadas por rupturas de bolsões de ar causando danos estruturais;
- Pode dificultar a operação de um filtro. A oscilação produzida pela variação de pressão do ar torna difícil manter boas operações do filtro. Além disso, as bolhas podem ficar presas nos grãos de areia reduzindo sua eficiência.

- Acréscimo de perda de carga:

A perda de carga depende das dimensões da bolsa de ar, da inclinação do conduto e da vazão. Enquanto o tipo do regime do escoamento é livre, o fluxo ocorre sob a camada de ar e o gradiente hidráulico segue a declividade da tubulação. Perdas adicionais surgem por meio de um ressalto hidráulico na transição do escoamento (Escarameia, 2005). Richards (1962, *apud* Estrada, 2007) coloca que em se aplicando a equação da energia na parte superior e inferior do bolsão, a respectiva perda de carga será praticamente igual à componente vertical das dimensões desse bolsão. Em contrapartida, pequenas quantidades de ar podem reduzir o atrito, uma vez que o perímetro molhado será menor (Little *et al.*, 2008).

- Golpe de aríete causado pela remoção do ar (*air hammer*) e mudança na magnitude da onda de pressão:

O golpe de aríete é um fenômeno que ocorre em condutos forçados quando o escoamento sofre uma aceleração ou retardo brusco, causado, entre outras razões, pelo acionamento rápido de uma válvula, por eliminação do bolsão de ar (de forma abrupta ou mitigada) ou pela parada de uma bomba.

Em transientes hidráulicos, a presença de bolsões de ar resulta em ondas de pressão que são fortemente amortecidas e deformadas. As pequenas acumulações de ar, também, podem causar um efeito adverso sobre os transientes de pressão aumentando seus respectivos picos (Lauchlan *et al.*, 2005). O acionamento de bombas e a abertura de válvulas em adutoras tem sido a causa de vários acidentes, geralmente devido a não existência de uma forma prática para a eliminação do ar aprisionado (Wylie & Streeter, 1983).

A Figura 3.7 mostra o aumento da pressão resultante da compressão do ar no ponto terminal de uma adutora sem ventilação num trabalho pioneiro realizado por Martin em 1976 e apresentado em Wylie and Streeter (1973). Nota-se que a pressão chega a ser quase oito vezes superior à carga piezométrica inicial que gerou a compressão da coluna. Em outras palavras, dada a inércia da coluna de água, a pressão do ar precisa nessa aplicação ser muito superior à pressão do reservatório para que possa haver a interrupção e reversão da vazão que causou a compressão do bolsão.

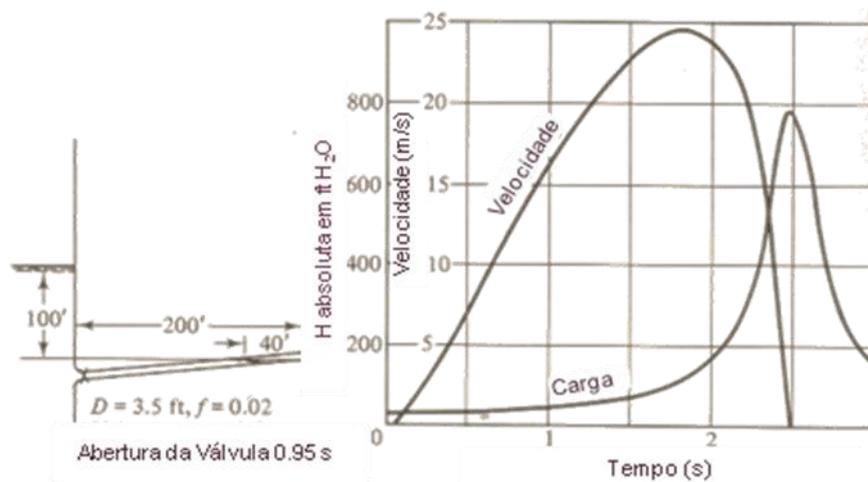


Figura 3.7: Carga piezométrica e velocidade do escoamento *versus* tempo. Adaptado de Wylie & Streeter (1983).

No caso da remoção de bolsões de ar, é possível que ocorram mudanças abruptas na velocidade do escoamento, induzindo o golpe de aríete e um aumento de pressão de magnitude ΔH . Esse fenômeno, conhecido como “*air hammer*” é descrito por Lingireddy *et al.* (2004), de forma simplificada, no qual um conduto com bolsão de ar é representado por dois condutos de mesmas propriedades conectados (Figura 3.8).

$$\Delta H = \frac{C}{gA_c} \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} \quad (3.4)$$

Considerando que $Q_A = Q_1 + Q_2$ e desprezando os efeitos da compressibilidade, tem-se que a magnitude do golpe de aríete causado pela eliminação do ar pela ventosa é:

$$\Delta H = \frac{C}{gA_c} \frac{Q_A}{2} \quad (3.5)$$

Esse trabalho comparou dados de desempenho de válvulas de ar com predições teóricas, considerando condições de não estrangulamento e com estrangulamento, Lingireddy *et al.* (2004) derivaram as seguintes equações empíricas:

$$\left\{ \frac{\Delta H}{C/g} \right\} = 0.3944 \left\{ e^{-0.029(\ln H_A)^2 + 0.425(\ln H_A) + 5.206} \right\} \left(\frac{d_o}{d_p} \right)^2 \quad (3.6)$$

$$\left\{ \frac{\Delta H}{C/g} \right\} = 0.3944(0.465H_A + 494) \left(\frac{d_o}{d_p} \right)^2 \quad (3.7)$$

H_A pressão do ar;

d_o diâmetro do orifício;

d_p diâmetro do conduto.

As equações simplificadas embora não considerem a compressibilidade do bolsão de ar, tem o objetivo de estimar picos de pressão no conduto após a liberação deste. A Figura 3.9 é a representação gráfica das equações 3.6 e 3.7. No eixo das abscissas, encontra-se o valor da pressão do ar antes de sua expulsão e nas ordenadas o acréscimo de pressão após a liberação do ar. O gráfico permite dimensionar o tamanho do orifício para escape do ar mediante o valor pré-estabelecido de pressão que o sistema poderá suportar. E permite, também, prever qual será a pressão resultante da expulsão do ar através da razão entre o valor do diâmetro da válvula (d_o) e do diâmetro do conduto (d_p).

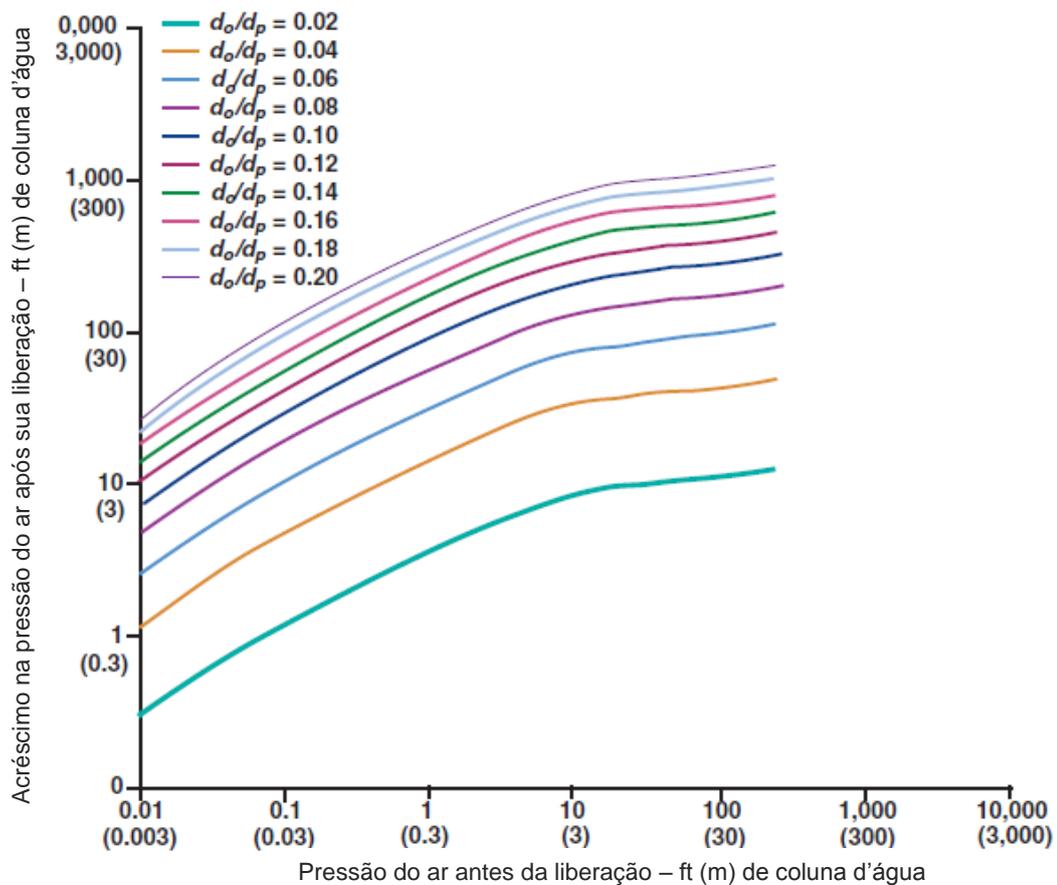


Figura 3.9 Pressão após expulsão do ar para diferentes tamanhos de orifício. Adaptado de Lingireddy *et al.* (2004).

- *Blowback*:

As adutoras com perfil longitudinal irregular podem propiciar a formação do ressalto hidráulico em pontos a montante de um trecho íngreme descendente, no qual ocorre um escoamento em regime livre. A depender da vazão de escoamento, esse ressalto incorpora ar, tais bolhas fluem para jusante e poderão sofrer coalescência originando bolsões. Permanecendo essas condições, o bolsão tenderá a aumentar, havendo a possibilidade de que a força de flutuação torne-se maior que a força de arraste (Figura 3.10). Nesse caso, o bolsão será deslocado para montante. Num dado momento, o ar presente no bolsão unir-se-á ao ar a montante do ressalto, causando súbito aumento de pressão. Esse fenômeno é denominado de *blowback* e possui uma considerável força hidráulica, podendo danificar estruturas hidráulicas (Estrada, 2007).

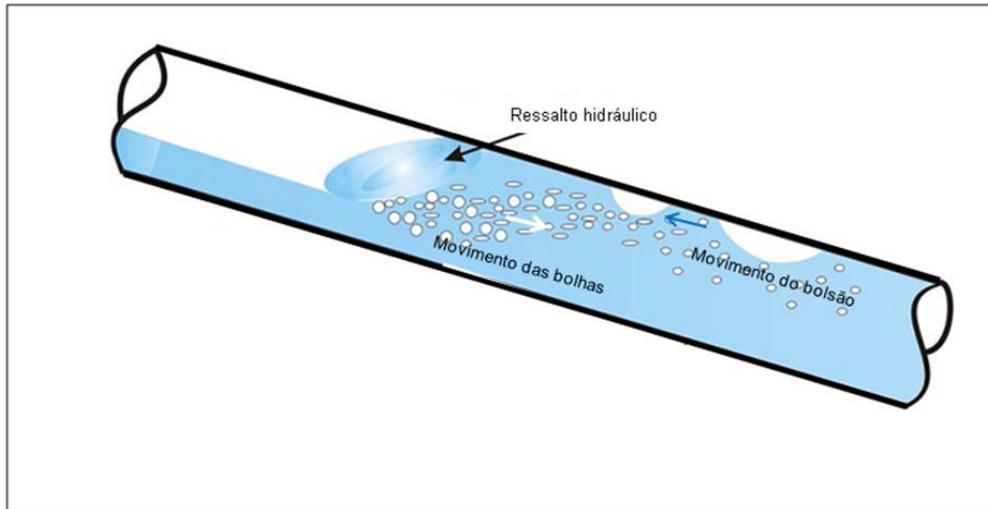


Figura 3.10: Incorporação de ar pelo resalto hidráulico. Adaptado de Estrada (2007).

- Redução de eficiência da bomba:

A presença de ar pode reduzir a eficiência da bomba. Sua admissão por uma bomba pode causar uma perda de escorva e também golpes de aríete (Lauchlan *et al.*, 2005). Havendo incremento de perdas de carga devido à acumulação de bolsões de ar, o novo ponto de operação do sistema migrará para um valor de vazão menor que o valor projetado. Frequentemente isso influenciará na diminuição do rendimento da bomba, como ilustrado esquematicamente nas Figuras 3.11 e 3.12, onde o ponto 1 refere-se ao sistema operando nas condições de projeto, e o ponto 2 operando com perdas de carga adicionais devido à presença de ar.

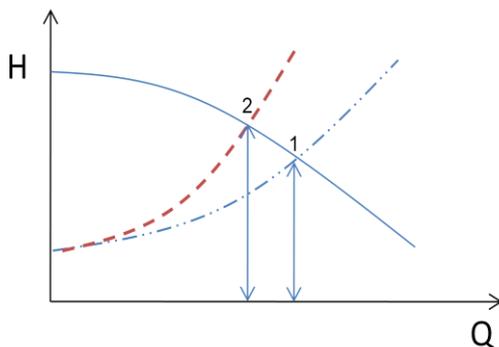


Figura 3.11: Curva da bomba hidráulica e curva do sistema.

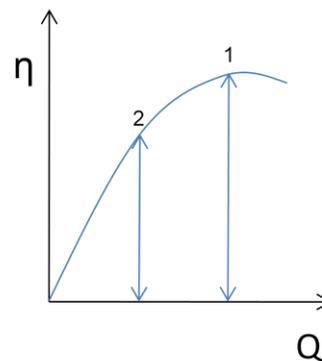


Figura 3.12: Curva de rendimento da bomba.

3.4 MECANISMOS DE REMOÇÃO DE AR EM ADUTORAS

Uma vez discutidas as causas e problemas associados ao aprisionamento de ar em adutoras, é importante ressaltar os mecanismos para remoção desse ar. Essa remoção pode ocorrer por meios hidráulicos ou por meios mecânicos.

a) Meios Hidráulicos:

Os meios hidráulicos correspondem à remoção de bolsões de ar pelo próprio fluido. Quanto à terminologia, tem-se:

- Velocidade de arraste (*sweeping velocity*): caracterizado pela velocidade mínima para transporte do bolsão de ar ou da bolha (Wisner, *et al.*, 1975);
- Geração: refere-se à entrada de bolhas no regime pressurizado provenientes de ressaltos hidráulicos com número de Froude elevado (ressaltos fortes);
- Incorporação: termo utilizado para descrever a junção de bolhas a um bolsão de ar;
- Velocidade de suspensão (*hovering velocity*): velocidade que mantém o bolsão de ar suspenso, sem movimentar-se. O valor médio dessa velocidade foi estudada por HR Wallingford (*apud* Little, 2008) e assume valores próximos a 90% da velocidade crítica, para condutos com inclinação variando entre 0,85° a 22,7°;
- Velocidade de remoção (*clearing velocity*): velocidade mínima para remoção do bolsão de ar. Também é conhecida como velocidade crítica. Para o cálculo dessa velocidade, há diversas formulações propostas até então e serão discutidas no próximo capítulo.

b) Meios Mecânicos:

Os meios mecânicos correspondem às válvulas e dispositivos denominados ventosas que possibilitam a eliminação de ar em condutos forçados. Ventosas de tríplex função ou válvulas quebra vácuo permitem a entrada de ar quando ocorre redução de pressão na adutora a valores subatmosféricos durante o esvaziamento da tubulação por ocasião da manutenção. As ventosas permitem, ainda, a saída do ar acumulado em adutoras pelos processos já descritos nesse trabalho.

As ventosas são colocadas, geralmente, na parte alta de adutoras ou após um longo trecho horizontal ou com pequena declividade. Para melhor eficiência do equipamento, os aclives das tubulações a montante da válvula devem ser suaves, e os declives a jusante,

acentuados, isso no objetivo de acumular melhor o ar nos pontos altos e possibilitar sua expulsão pela ventosa (Tullis, 1989; Estrada, 2007). O manual *AWWA M11* (AWWA, 2004) apresenta uma série de recomendações acerca do posicionamento de ventosas e válvulas quebra vácuo.

De acordo com Tullis (1989), existem três tipos de ventosas automáticas:

- Ventosa simples de orifício grande: Essa válvula possui orifício com diâmetros que variam entre ½” a 36”. Permite que grandes quantidades de ar sejam admitidas ou liberadas quando do enchimento ou esvaziamento de uma linha. A ventosa possui um flutuador que desce por gravidade quando o tubo está vazio ou quando a pressão é negativa. Durante o escoamento forçado a linha está sob pressão e a válvula não consegue se abrir, podendo permitir o acúmulo de ar. Quando uma pressão negativa surge, o flutuador desce liberando a entrada do orifício para admissão de ar com a finalidade de prevenir ondas de pressão e outros fenômenos destrutivos, como o colapso da tubulação. Falvey (1980) adota como ventosa de grande orifício aqueles com diâmetros maiores que 1”. Tal tipo de válvula de ar é projetado para permanecer fechado depois que o tubo é preenchido pela água, não permitindo assim, a liberação de pequenas quantidades de ar durante a operação do sistema de abastecimento de água. Ele recomenda também que a velocidade do ar pelo orifício não exceda a 30 m/s a fim de se prevenir o enclausuramento do ar, fenômeno frequentemente referido como “fechamento dinâmico”.
- Ventosa simples de orifício pequeno: A válvula possui um orifício com diâmetro menor que ½”. Esse orifício permite a liberação de pequenas quantidades de ar que se acumulam após o enchimento. O orifício é controlado por um êmbolo conectado a um flutuador. O ar acumulado no corpo da válvula faz o flutuador descer liberando o orifício que permitirá a sua saída. Após a saída do ar, o flutuador sobe, devido ao aumento do nível do líquido, e o êmbolo fecha o orifício. Este tipo de válvula possui uma limitada capacidade para proteção de vácuo e não é recomendada para expulsar grandes quantidades de ar.
- Ventosa de tríplice função: O dispositivo compreende os mecanismos das duas válvulas anteriores, controla automaticamente a saída do ar durante o enchimento de uma linha ou de bolsões de ar que venham se formar com a linha já em operação e a entrada de ar

durante o esvaziamento. Dentre essa modalidade de válvula, há ainda duas divisões, as válvulas com fechamento gradual e as válvulas sem o fechamento gradual (Estrada, 2007). Esse mecanismo é relevante para diminuir os efeitos do golpe de aríete.

Mesmo com esses tipos de ventosas, há diversos problemas relacionados à sua operação, Balutto (1996, *apud* Lauchlan *et al.*, 2005) destaca os seguintes efeitos adversos:

- Vedação insuficiente a baixas pressões: Para uma vedação perfeita junto ao anel elástico localizado ao redor da circunferência do orifício, as dimensões da esfera devem ser bem ajustadas. Na prática, nem sempre é possível, sendo então compensado com anéis de assentamento emborrachados. Esses podem aderir ao flutuador prejudicando o funcionamento do orifício;
- Deformação e entupimento: a estrutura oca utilizado na esfera flutuante é susceptível às deformações permanentes quando submetidas a altas pressões e choques. Foi descoberto que na prática o flutuador pode dilatar e aderir ao orifício, impedindo o funcionamento desse.
- Fechamento prematuro: conhecido também como fechamento dinâmico refere-se à tendência da válvula de ser fechada pelo flutuador a uma pressão diferencial muito baixa sem quaisquer descargas posteriores. Testes realizados pelo CSIR (*Council for Scientific and Industrial Research*) na África do Sul, em válvulas para remoção de ar comumente usadas, indicaram que boa parte possuía propensão ao fechamento dinâmico a pressões diferenciais baixas (3-5kPa), bem abaixo do desempenho apresentado pelos fabricantes, que especificava uma pressão diferencial de 10kPa.
- Limitação do tamanho do orifício e seu efeito no desempenho: A vazão de remoção do ar pelas válvulas é afetada pelo grande diâmetro do orifício. Alguns fabricantes afirmam que o diâmetro da esfera flutuante deve ser no mínimo três vezes o tamanho do diâmetro do orifício, evitando, assim, sua obstrução. Por razões econômicas, o projetista acaba escolhendo um orifício menor e o desempenho de descarga acaba sendo afetado.

Balutto (1996 *apud* Lauchlan *et al.*, 2005) descreve ainda os problemas referentes a válvulas que removem ar a altas velocidades:

- O fechamento de uma válvula de ar, descarregando a altas pressões e velocidades diferenciais, poderá produzir altas pressões transientes;

- A ocorrência do extravasamento da água (*spillage*) ocorre quando o flutuador do orifício grande falha em impedir a entrada da água em alta velocidade. Um efeito adicional do derramamento é a indução de uma onda de pressão no conduto.
- A falha de vedação pode provocar o fechamento do orifício grande e resultar no derramamento de água. Testes indicaram que este fenômeno ocorre a 8,0 a 8,5 MPa, no qual implica que os transientes criados por válvulas descarregando ar a altas pressões diferenciais são maiores que 8,5 MPa.
- Efeito Venturi: considerando válvulas de ar com flutuadores esféricos, sabe-se da tendência que o flutuador possui de obstruir parcialmente o orifício durante a entrada de ar. Isso se deve a uma zona criada sobre o flutuador com uma pressão mais baixa do que a encontrada na tubulação.

Quanto à localização, o manual da *American Water Works Association* (AWWA, 2004) faz as seguintes sugestões:

- Pontos altos: são necessárias válvulas de tríplice função nesses pontos para fornecer ventilação enquanto a tubulação está sendo preenchida e também para entrada de ar quando ocorrer sua drenagem.
- Mudança de declividade: Uma válvula de tríplice função deve ser adotada em mudanças bruscas de declive. Isso se deve a possibilidade da ocorrência de vácuo e da separação da coluna de água. Na seleção da válvula deve se considerar o efeito Venturi (Estrada, 2007).
- Mudança de inclinação em aclives: Uma válvula de orifício grande ou uma válvula de tríplice função deve ser considerada.
- Aclives longos: Uma válvula de orifício grande (entrada de ar e saída) ou válvula de ar de tríplice função deve ser adotada em intervalos de 400 m a 800 m ao longo das seções ascendentes.
- Longos declives: Uma válvula de orifício grande (entrada de ar e saída) ou válvula de ar de tríplice função deve ser adotada em intervalos de 400 m a 800 m ao longo das seções descendentes.
- Trechos horizontais longos: Ventosas de tríplice função devem ser colocadas no início e no final de cada trecho horizontal, também deve ser considerado em intervalos de 400 metros ao longo do comprimento. Trechos assim deverão ser evitados, não sendo possível, recomenda-se que mais válvulas sejam instaladas ao longo do trecho horizontal (Estrada, 2007).

- Medidor Venturi: Ventosa de pequeno orifício deve ser instalada a montante do medidor para evitar imprecisão na medição devido ao ar aprisionado.
- Linha de Recalque: Uma válvula de grande orifício deve ser adotada na descarga da bomba, neste caso submersa, e antes da válvula de retenção, para permitir saída do ar em seu acionamento e entrada do ar após o desligamento.
- Sifões: Para manter um sifão em uma seção da tubulação que se estende acima do gradiente hidráulico e que funciona constantemente sob pressão negativa, válvulas de pequeno orifício devem ser adotadas no ponto alto do sifão para ventilação.

4 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo apresenta algumas pesquisas, tanto de cunho experimental quanto numérico, importantes para o entendimento acerca das interações entre o ar e a água durante os escoamentos em condutos. O capítulo apresenta: 4.1) Movimento de bolsões de ar no regime pressurizado de adutoras e 4.2) Modelagem numérica do processo de enchimento de adutoras.

4.1 MOVIMENTO DE BOLSÕES DE AR NO REGIME PRESSURIZADO EM ADUTORAS

Na pesquisa de Kalisnke & Bliss (1943), foram avaliados os mecanismos de remoção de ar em tubos inclinados. Houve a formação de ressalto hidráulico em boa parte dos ensaios, menos nas condições quase horizontais. Notou-se que a taxa na qual o ressalto admite ar, não era necessariamente correspondente à taxa de remoção deste. E a sua jusante, exceto pelas bolhas, a vazão fluía a plena seção.

A taxa na qual o ar era removido dependia da velocidade da água fluindo no tubo. Houve uma determinada vazão que para qualquer diâmetro de tubo e inclinação, a taxa de ar admitido pelo ressalto era igual à taxa de transporte desse a jusante. Esses dados são apresentados na Figura 4.1. Os resultados apresentam que a remoção de ar foi controlada por dois fenômenos hidráulicos. Para menores vazões, a remoção do ar foi controlada pelas características do escoamento a jusante do ressalto e para vazões maiores, a remoção do ar foi controlada pelo ressalto hidráulico, uma vez que o fluxo de água carregou todo o ar admitido pelo ressalto. Foi notado também, que bolhas menores eram mais facilmente carregadas para jusante, porém aderiam a outras bolhas formando um bolsão que se movimentava para montante. A análise feita por Kalinske & Bliss indicou que a relação entre a taxa volumétrica de remoção de ar para descarga de água Q_a / Q_w está relacionada com a inclinação tubo, S , e a taxa de vazão adimensional definida por Q_w^2 / gD^5 , onde g é a aceleração da gravidade, e D o diâmetro do tubo. A plotagem dos dados indicou a existência de uma relação geral, em que o valor de Q_a / Q_w aumenta com Q_w^2 / gD^5 em qualquer declividade (Figura 4.1).

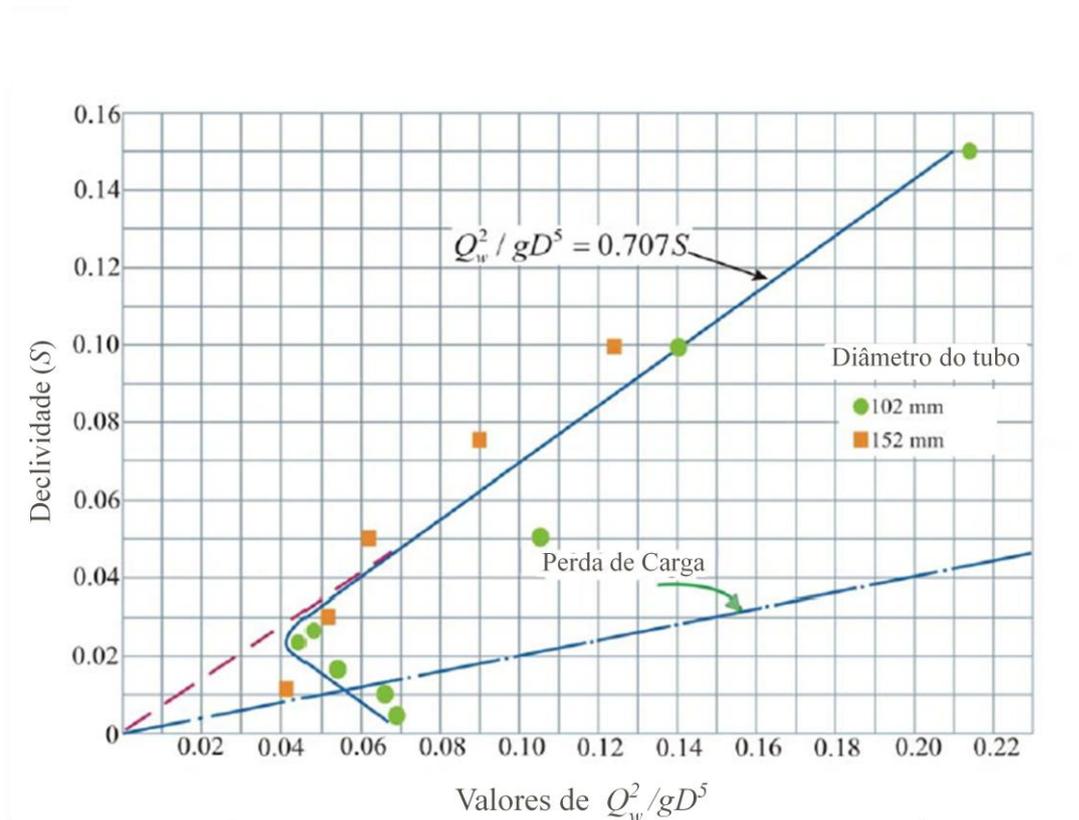


Figura 4.1. Dados experimentais apresentando a relação entre a declividade da tubulação, o diâmetro da tubulação, a vazão de água e o gradiente hidráulico, quando se inicia a remoção de ar (Adaptado de Kalinske & Bliss, 1943).

A relação apresentada no gráfico acima pode ser expressa por:

$$\frac{Q_w^2}{gD^5} = 0.707.S \quad (4.1)$$

Em que:

- D Diâmetro do tubo;
- g Aceleração da gravidade;
- S Declividade da tubulação;
- Q_w Vazão de água na tubulação.

Estudos realizados por Kalinske & Robertson (1943) verificaram a admissão de ar através do ressalto hidráulico. Eles utilizaram na pesquisa um tubo com diâmetro interno de 149,4 mm, com 10,7 metros de comprimento, inclinado negativamente a jusante com as seguintes inclinações 0%, 0,2%, 2%, 5%, 10%, e 30%. As principais conclusões foram: - O ar admitido pelo ressalto hidráulico durante o escoamento forma um grande bolsão e esse ressalto estende-se até chegar ao ponto no qual o ar deixa a tubulação; - Em ensaios de

pequena vazão, o bolsão de ar não se estende até o fim do tubo, e há ocorrência de *blowbacks*; - Uma condição crítica foi estabelecida: Acima dela a taxa de remoção do ar irá depender da capacidade do ressalto hidráulico de admiti-lo, o que depende do número de Froude a jusante (Figura 4.2). Abaixo dessa condição crítica, a remoção do ar será regida pelas condições hidráulicas e não pelo ressalto (Figura 4.3). Os dados permitiram chegar à Equação 4.2:

$$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (4.2)$$

Onde:

Q_a vazão de ar;

Q_w vazão de água;

F_1 número de Froude a montante do ressalto hidráulico.

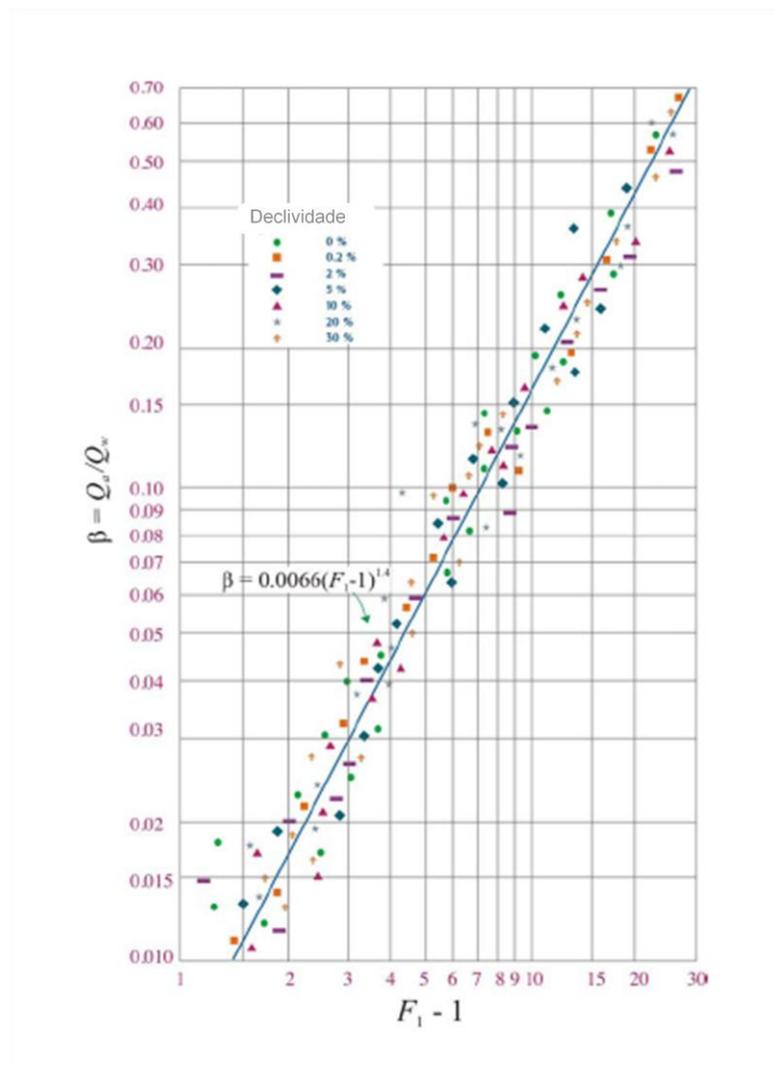


Figura 4.2. Correlação de dados sobre a taxa de ar removido pelo ressalto hidráulico (Adaptado de Kalinske & Robertson, 1943).

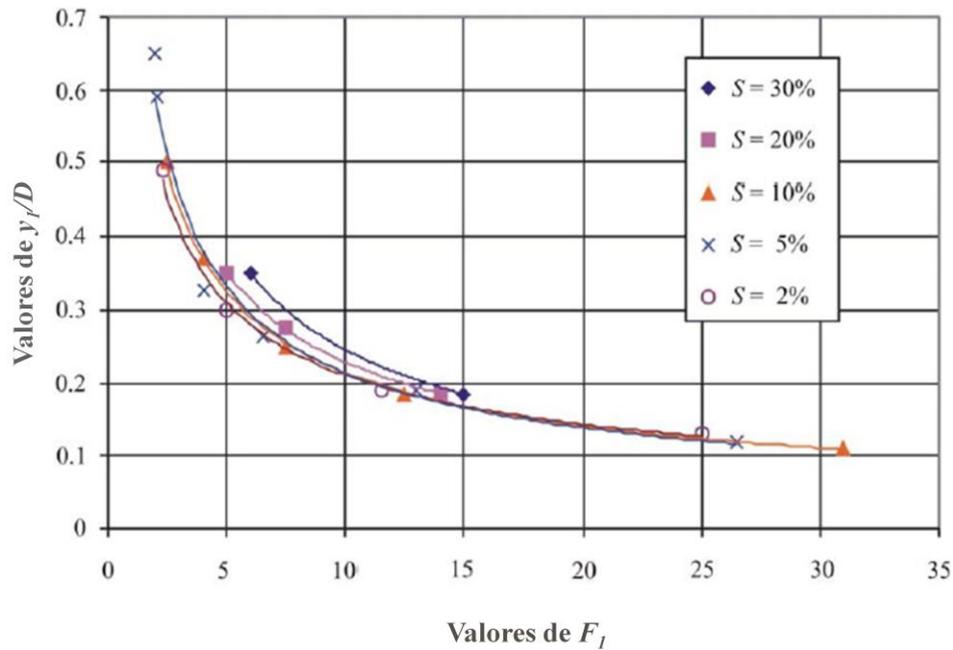


Figura 4.3. Valores experimentais para o número de Froude crítico a jusante do ressalto hidráulico (Adaptado de Kalinske & Robertson, 1943).

Kent (1952) em sua pesquisa verificou a taxa de remoção de ar através do ressalto hidráulico que se formava em sua extremidade, em uma tubulação de acrílico com 100 mm de diâmetro e 5,5 m de comprimento. Ele observou que essa taxa de remoção está relacionada com a força de arraste propiciado pelo escoamento e que uma taxa efetiva de remoção ocorria quando a velocidade média da água era igual ou maior a uma velocidade limite. Uma fórmula semi empírica foi desenvolvida para determinar essa velocidade mínima, que por sua vez encontra-se representada em função da declividade e do diâmetro do conduto.

$$v_{\min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \quad (4.3)$$

v_{\min} velocidade crítica para remoção;

D diâmetro do tubo;

C_0 determinado em função do formato do bolsão.

C_0 é em função do formato do bolsão de ar e a partir dos dados experimentais, foi verificado que seus valores tornam-se constantes para comprimentos de bolsões de ar maiores que $1,5D$. A fórmula de Kent é muitas vezes utilizada na prática devido à sua

simplicidade. No entanto, um exame da fórmula mostra que há um desvio sistemático dos seus resultados (Figura 4.4).

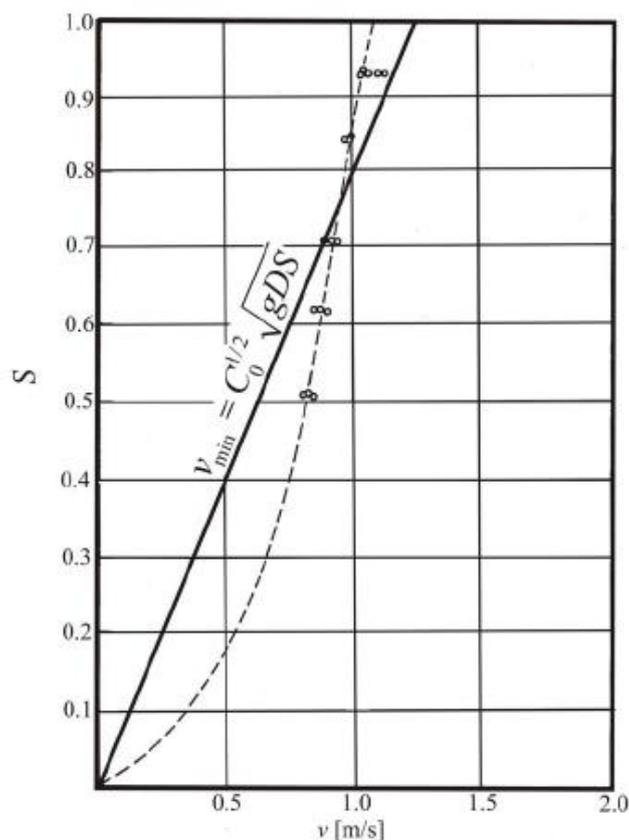


Figura 4.4. Relação da velocidade mínima com a declividade (Adaptado de Kent, 1952).

Wisner, *et al.* (1975) simulou um modelo físico para algumas condições em que diferentes pesquisadores trabalharam e verificou suas respectivas recomendações. O modelo usou tubulações em acrílico de até 244 mm de diâmetro e 7,3 m de comprimento, no qual durante o escoamento era inserido um bolsão de ar. A velocidade da água era alterada mantendo o equilíbrio do bolsão. Foi observado, que com o aumento da velocidade, o bolsão tinha seu tamanho reduzido até o momento em que seu tamanho não era mais alterado com esse aumento, porém possibilitava seu arraste. Os experimentos permitiram concluir dois pontos importantes: A velocidade limite não se torna um valor constante com o aumento do diâmetro da tubulação, mas é decrescente em relação a este, e; O comprimento limite, percorrido por esse bolsão, também não se torna constante com o aumento do diâmetro, mas diminuía com a redução da vazão. A fórmula, portanto, sugerida para determinação da velocidade crítica é apresentada a seguir:

$$v_c / \sqrt{gD} = 0.25\sqrt{S} + 0.825 \quad (4.4)$$

v_c velocidade crítica para remoção;
 D diâmetro do tubo.

Escarameia *et al.* (2005) através de estudos realizados em um ensaio, utilizando um tubo com 150 mm de diâmetro e inclinação variando de 0° a 22,5°, sugere a expressão apresentada na Equação 4.5. Tal estimativa foi baseada numa série com diversos tamanhos de bolsões e suas respectivas velocidades críticas. A equação mostra a relação da velocidade crítica não apenas com a declividade do conduto, mas incorpora também, o tamanho do bolsão.

$$v_c / (gD)^{0.5} = b + 0.56(\text{sen}\theta)^{0.5} \quad (4.5)$$

Onde b é igual:

0,45 para $n_a < 0,06$;

0,50 para $0,06 \leq n_a \leq 0,12$;

0,57 para $0,12 \leq n_a \leq 0,30$, e;

0,61 para $n_a \geq 0,30$.

n_a volume do bolsão de ar: $\pi D^3/4$;

θ inclinação do conduto.

Falvey (1980) apresentou um gráfico (Figura 4.5) que mostra os limites de bolsões de ar e movimento de bolhas de ar em condutos fechados, com base nos dados apresentados por outros autores. Falvey comenta que a direção do movimento tomado pelas bolhas ou bolsões de ar pode ser analisada tendo em conta a magnitude relativa das forças de empuxo e arrasto sobre uma bolha estacionária no escoamento. Para bolhas que se movem perpendicularmente ao eixo do tubo, tem-se que a componente do vetor força de empuxo é igual a componente força de arrasto.

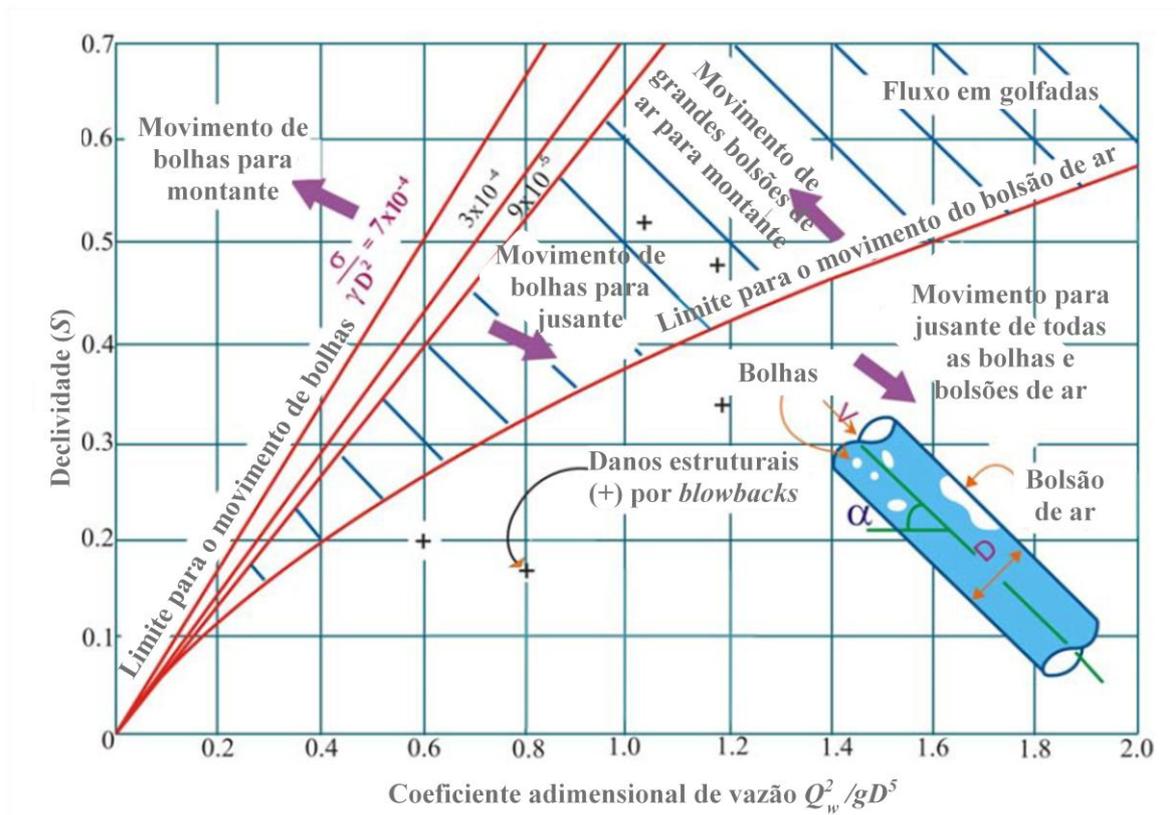


Figura 4.5. Taxas de escoamento necessárias para o transporte de bolhas e bolsões de ar (Adaptado de Falvey, 1980).

Little (2002) procedeu uma revisão detalhada dos mecanismos do transporte de bolsões de ar nas tubulações, revisando um amplo conjunto de estudos experimentais anteriores, chegando às seguintes conclusões: - Os dados publicados nem sempre são consistentes uns com os outros ou com o histórico de casos. As diferenças podem ser devidas aos procedimentos dos ensaios, à obtenção de dados, deduções usadas e variáveis que não são as diagramadas; - Os testes mostraram que as bolhas de ar serão transportadas mais facilmente do que bolsões de ar, porém tenderão a aglomerar-se em bolsões na parte superior do tubo; - Sob típicas condições de operação, os bolsões de ar serão transportados à jusante em tubos com baixas inclinações, mas não serão transportados contra inclinações íngremes; Para um dado diâmetro e inclinação de tubo, existe um valor específico nos quais os bolsões de ar ficarão estacionados. E por fim, dentre os trabalhos revisados, o autor concluiu que o trabalho elaborado por Kent (1952) é o mais adequado para a determinação da velocidade crítica.

Mesmo com esses resultados apresentados, é importante ressaltar que não existem fórmulas gerais aceitas para os critérios de bolhas de ar ou de transporte do bolsão

pelo fluxo na tubulação. Divergências existentes entre as várias equações propostas são principalmente devidas aos diferentes diâmetros, materiais e procedimentos de ensaio utilizados (Lauchlan *et al.*, 2005).

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA DO ENCHIMENTO DE CONDUTOS FECHADOS

Outros autores também têm investigado experimentalmente o enchimento rápido de um conduto e comparado tais resultados com predições de modelos numéricos.

Liou e Hunt (1996) investigaram experimentalmente o enchimento de longas adutoras com variações no perfil topográfico e compararam esses resultados com predições do modelo numérico desenvolvido por eles. O modelo desenvolvido é baseado no Método da Coluna Rígida, no qual as equações diferenciais de escoamento em adutoras são aproximadas pela equação do escoamento na formulação da coluna rígida:

$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{P_o}{\rho L} + g \cdot \text{sen} \phi - f \frac{V^2}{2D} \right) A_c \quad (4.6)$$

Em que as variáveis expressam:

- Q vazão
- t tempo
- P_o pressão imediatamente a jusante da válvula na saída do reservatório
- ρ massa específica da água
- L comprimento da coluna de água no segmento de tubo que está sendo preenchido
- g aceleração da gravidade
- ϕ ângulo entre o centro do conduto e a superfície do escoamento
- f fator de atrito
- V velocidade média da coluna de água.
- D diâmetro do conduto
- A_c área transversal do conduto.

A modelagem realizada adotou quatro hipóteses: - O conduto permanece cheio de forma que a coluna de água tem um formato bem definido; - A pressão na face do enchimento é

atmosférica; - A abordagem da coluna rígida é aplicável, e; - O atrito resistente ao escoamento permanente pode ser empregado no cálculo.

O comprimento L da coluna é determinado pela Equação 4.7. Essa formulação considera a variável L_{min} que assume valor não nulo e corresponde a coluna que preenche toda a seção transversal a montante da válvula.

$$L = L_{min} + \int_0^t V dt \quad (4.7)$$

A Figura 4.6 apresenta esquematicamente as variáveis envolvidas.

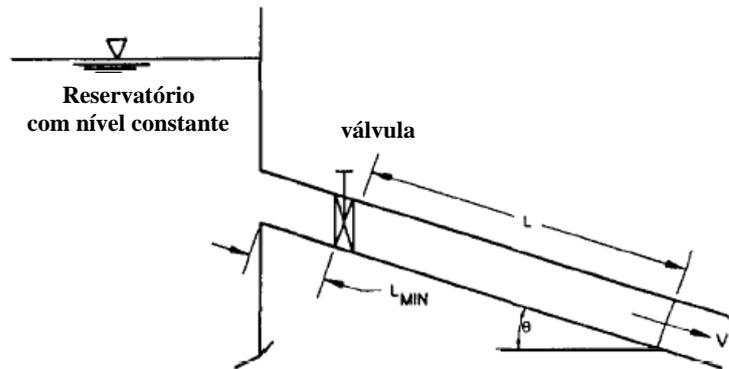


Figura 4.6. Desenho esquemático do aparato experimental - enchimento de adutoras. Adaptado de Liou e Hunt (1996).

As características das instalações experimentais utilizadas por Liou e Hunt (1996) compreendem um conduto com diâmetro interno de 0,023 m e comprimento de 6,66 m (3,55 m a uma declividade de $2,66^\circ$ e 3,11 m com declividade de $2,25^\circ$) conectado a uma válvula de abertura rápida na saída de um reservatório com carga constante de 0,354 m. Os autores mediram a evolução da linha piezométrica por manômetros instalados ao longo do conduto. A vazão foi determinada pelo método volumétrico e a chegada da frente de enchimento foi acompanhada através de sensores elétricos.

Os resultados experimentais e as previsões do modelo numérico proposto, referente à variação de velocidade com o avanço da coluna de água, são apresentados na Figura 4.7.

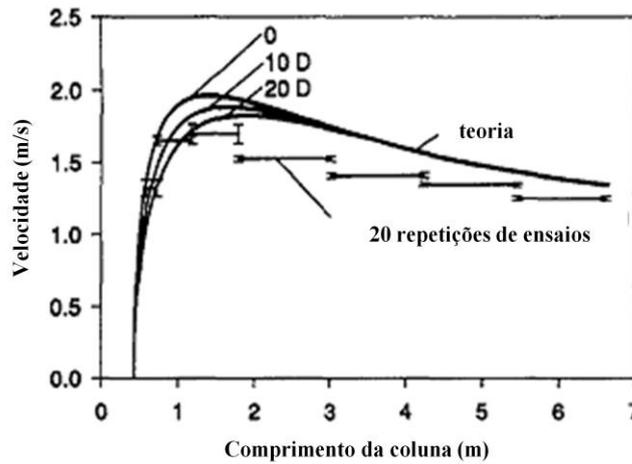


Figura 4.7: Comparação entre resultados teóricos e experimentais. Adaptado de Liou e Hunt (1996).

Observa-se súbito aumento inicial no valor da velocidade, seguida por uma gradual redução. Isso ocorre devido ao aumento da força de atrito do conduto à medida que o mesmo é preenchido. Quanto aos resultados do modelo, esses se aproximam mais dos valores experimentais no caso em que o comprimento sujeito ao efeito de aceleração local na tomada de água no reservatório é de 20 diâmetros e ainda de acordo com os autores o modelo desenvolvido é aplicável quando a velocidade do escoamento é suficiente elevada (Liou e Hunt, 1996). Apesar de uma aproximação considerável entre os dados experimentais e o modelo, os resultados podem não ser representativos para adutoras reais, uma vez que a relação entre a carga piezométrica à montante da adutora e o diâmetro assumiu valores altos ($H/D \sim 19$), não comumente observados em processos de enchimento gradual de adutoras, além do que a hipótese de interface vertical das colunas também não é aplicável, como posteriormente foi comprovado por Guizani *et al.* (2005).

Outro modelo foi proposto por Izquierdo *et al.* (1999) que também avaliava o enchimento de adutoras. Na concepção da modelagem adotaram: o Método da Coluna Rígida utilizando a equação de momento para a fase líquida (Equação 4.8); consideraram a aceleração local como Liou e Hunt (1996) e simularam adutoras que possuíam bolsões de ar aprisionados nas condições iniciais, ou seja, com ar entre pontos de acumulação de água nos pontos baixos ao longo do seu perfil.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{p_0^* - p_1^*}{\rho L_e} - g \frac{\Delta z}{L_e} - \frac{fV|V|}{2D} \quad (4.8)$$

p_0^* pressão de montante no conduto

- p_1^* pressão do bolsão de ar
 L_e comprimento da coluna de enchimento
 Δz diferença de cota geométrica

Demais variáveis como definidas anteriormente.

Adotando o ar como gás ideal, os autores consideraram que as pressões dos bolsões presos entre duas colunas de água poderiam ser descritos pela expressão:

$$p_i^* (x_i - x_{i-1} - L_{b,i-1})^n = p_{i,0}^* (x_{i,0} - x_{i-1,0} - L_{b,i-1})^n = \text{constante} \quad (4.9)$$

- x_0 coordenada espacial
 $L_{b,0}$ comprimento da coluna de bloqueio
 n coeficiente politrópico ($n = 1,0$ - processo isotérmico; $n = 1,4$ - processo adiabático)

Onde $x_0 = 0$ e $L_{b,0} = L$ para o primeiro bolsão de ar ($i = 1$).

A configuração da adutora típica simulada é apresentada na Figura 4.8.

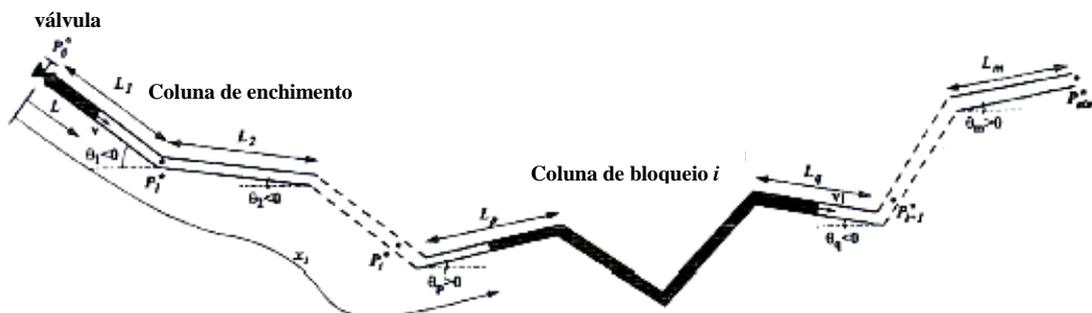


Figura 4.8: Perfil da adutora simulada. Adaptado de Izquierdo (1999).

Um aparato experimental foi elaborado por Fuertes *et al.* (2000) para verificação e validação do modelo proposto por Izquierdo (1999). O aparato experimental utilizou uma tubulação de acrílico com diâmetro de 18,8 mm e com comprimento total de 6,90 m distribuídos numa perfil topográfico irregular. A alimentação de água dava-se por meio do acionamento de uma bomba entre os tanques de montante e jusante.

Os resultados experimentais permitiram observar que a previsão do modelo aproxima-se mais dos dados experimentais, enquanto existe ar entre a coluna de enchimento (introduzida pelo acionamento da bomba) e a coluna de bloqueio. Quando a coluna de bloqueio é removida da linha, foi notada uma considerável diferença entre os valores experimentais e numéricos.

O estudo concluiu que a presença de bolsões de ar aprisionados nos condutos pode ocasionar diferenças significativas entre os resultados reais de um enchimento de adutora e os gerados por modelos numéricos. Concluiu-se também que, quanto menor for o bolsão de ar aprisionado no conduto, maior será a pressão gerada por sua compressão, o que já era antecipado pelo modelo de Izquierdo *et al.* (1999). Em outras palavras, quanto menor esse bolsão de ar, mais compressão ele sofrerá a fim de adquirir pressão suficiente para deslocar a coluna de bloqueio à jusante. Outro fator relevante é que os dados obtidos mostraram-se pouco sensíveis às variações nas alternativas de cálculo do fator de atrito. Assim para previsão através de modelos numéricos em enchimento de adutoras, não há necessidade de utilizar esse fator dependendo de condições transientes. É importante relevar que o modelo proposto por Izquierdo *et al.* (1999) pode ter sua aplicabilidade limitada em situações de enchimento gradual de adutoras, pois adotou valores de H/D elevados ($H/D > 85$), ausência de ventilação e presença inicial de água nos pontos mais baixos.

Outro estudo, de grande relevância, foi realizado por Zhou *et al.* (2002). Tal pesquisa consistiu em análises experimentais e numéricas para descrever o enchimento rápido de um conduto contendo ar aprisionado, avaliando-se os efeitos transientes relacionados à expulsão desse ar através de um orifício colocado a jusante. O aparato experimental foi constituído por uma tubulação de aço galvanizado com 10 metros de comprimento e 35 mm de diâmetro conectada a um tanque (1,20 m × 0,42 m) abastecido pela rede municipal de distribuição de água. A esquematização do aparato experimental é apresentada na Figura 4.9.

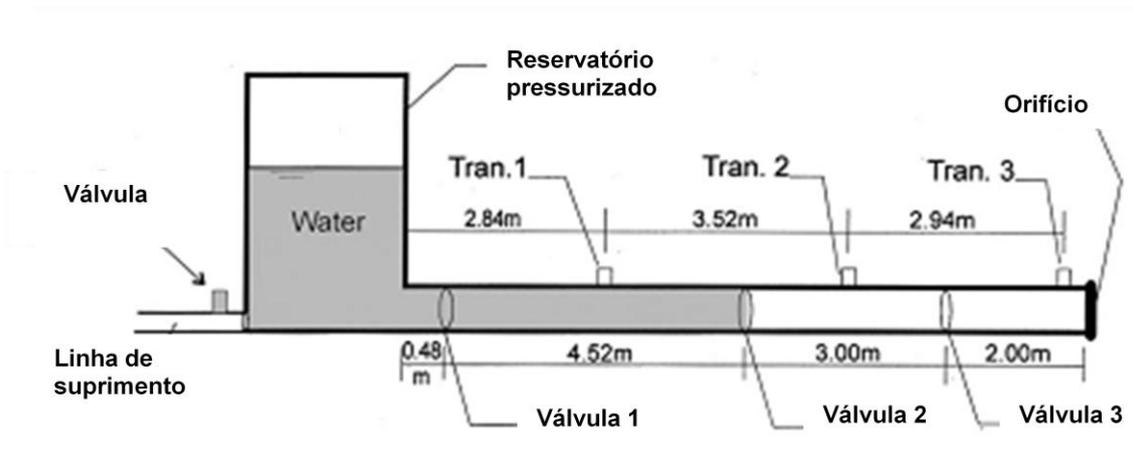


Figura 4.9: Esquemática do aparato experimental. Adaptado de Zhou *et al.* (2002).

As variáveis experimentais compreendiam quatro cargas piezométricas de montante (347 kPa, 275 kPa, 206 kPa e 137 kPa) , três valores de comprimento da coluna de água (0,48 m, 5m e 8m) controlados pelo acionamento das válvula 1, 2 e 3 e 12 orifícios com tamanhos variando entre 0 a 19,8 mm. A combinação dessas variáveis totalizou 144 ensaios.

A análise numérica consistiu no modelo de coluna rígida e foi desenvolvido assumindo uma tubulação horizontal, o bolsão de ar ocupando toda seção transversal e a interface ar-água vertical. A equação que determina a pressurização assume a hipótese de que a ventilação é pouco eficiente e o bolsão localizado no final da adutora sofreria pressurização conforme o avanço na coluna d'água no eixo horizontal. Tal equação é apresentada logo a seguir:

$$\frac{dH^*}{dt} = -k \frac{H^*}{V_a} \cdot \frac{dV_a}{dt} \left(-k \frac{H^*}{V_a} Q_a \right) \quad (4.10)$$

Onde:

- H^* pressão absoluta do ar;
- Q_a descarga de ar pelo orifício;
- k expoente politrópico;
- V_a volume de ar.

A vazão de escape do ar pelo orifício é determinada por duas fórmulas. A fórmula utilizada depende da relação H^*/H_b^* (onde H_b^* corresponde à pressão absoluta inicial). Se a relação

for menor que 1,89 a vazão pode ser calculada pela Equação 4.11, caso seja maior que 1,89, significa que ocorre escoamento estrangulado de ar pelo orifício e a vazão é determinada pela Equação 4.12.

$$Q_a = C_d A_o Y \sqrt{2g \cdot \frac{\rho_w}{\rho_a} \cdot (H^* - H_b^*)} \quad (4.11)$$

$$Q_a = C_d A_o \sqrt{2g \cdot \frac{\rho_w}{\rho_a} \cdot (H^* - H_b^*)} \cdot \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (4.12)$$

C_d coeficiente de descarga do orifício;

A_o área do orifício

ρ_w massa específica da água;

ρ_a massa específica do ar.

O fator Y de estrangulamento do escoamento é expresso pela Equação 4.13.

$$Y = \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \left(\frac{H_b^*}{H^*} \right)^{2/k} \cdot \frac{1 - \left(\frac{H_b^*}{H_b} \right)^{(k-1)/k}}{1 - \left(\frac{H_b^*}{H_b} \right)}} \quad (4.13)$$

Os resultados obtidos experimentalmente e numericamente indicaram três padrões de oscilação da pressão nos eventos transientes. Os diferentes tamanhos do orifício de jusante para o escape do ar influenciaram nos efeitos do golpe de aríete. Esses padrões estão descritos na Tabela 4.1, correlacionando a razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro do conduto (d_o/D) com os efeitos observados.

Tabela 4.1: Padrões de pressão para diferentes tamanhos de orifício. Adaptado de Zhou *et al.* (2002)

Comportamento	d_o/D	Efeitos
Tipo 1	<0,086	- Forte efeito de amortecimento do ar; - Golpe de aríete desprezível; - Padrão regular de oscilação de pressão com baixa frequência;
Tipo 2	0,086~0,2	- Moderado efeito do amortecimento do ar; - Golpe de aríete é mitigado; - Padrão de oscilação de pressão tem comportamento regular de baixa frequência antes do colapso do bolsão. Com a ruptura a pressão comporta-se irregularmente por um curto período.
Tipo 3	>0,2	- Baixo efeito de amortecimento do ar; - O golpe de aríete é predominante.

Outra investigação experimental foi conduzida por Guizani *et al.* (2005), na qual analisaram o enchimento rápido de condutos vazios. O arranjo experimental, indicado esquematicamente na Figura 4.10, compreende um reservatório a montante (2,96 m² de área da seção transversal) ligado a uma tubulação em acrílico de 14,6 m de comprimento, diâmetro interno de 94 mm e com inclinação ajustável. O nível do reservatório foi mantido praticamente constante durante o enchimento do conduto. As condições experimentais estão apresentadas na Tabela 4.2. Os valores de H/D foram escolhidos para emular condições esperadas em enchimento de adutoras, ou seja, valores de H/D pequenos, que resultam em enchimento gradual.

Tabela 4.2: Faixa das condições experimentais. Adaptado de Guizani *et al.* (2005).

Parâmetro	Faixa de teste
Declividade da adutora	Horizontal; 1,02% descendente; 0,4% ascendente.
Carga Piezométrica de montante	3,9D; 6,6 D; 9,2 D.

O início do fluxo era provocado pela rápida remoção de uma válvula, e assim a morfologia da frente de enchimento foi observada (Figura 4.10).

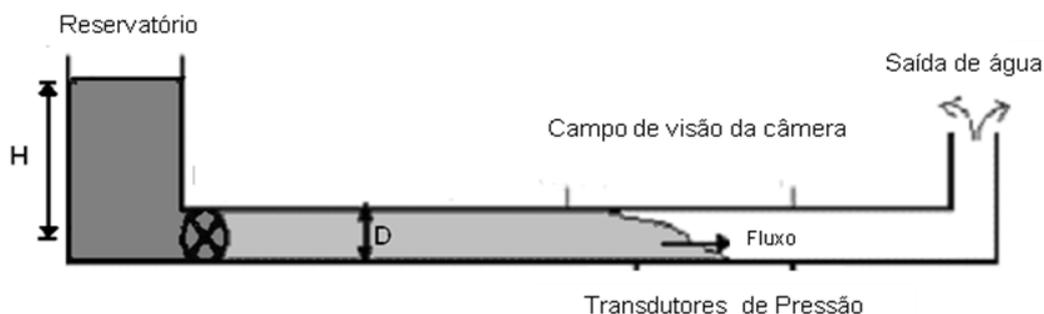


Figura 4.10: Desenho esquemático. Adaptado de Guizani *et al.* (2005).

Conforme indicado na Figura 4.11, no caso do conduto horizontal, a frente de enchimento para carga de $H/D = 9,2$ chegou ao comprimento de 6,8 diâmetros; para a carga de $H/D = 6,6$ chegou a 8,7 diâmetros e; para $H/D = 3,9$, excedeu 23 diâmetros.

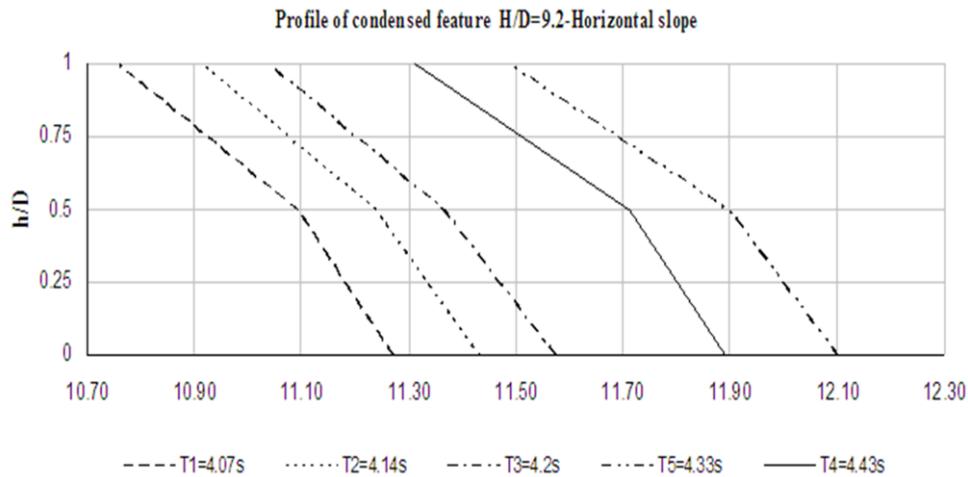


Figura 4.11: Perfil da frente de enchimento para $H/D = 9,2$ com adutora na horizontal. Adaptado de Guizani *et al.*(2005).

Na Figura 4.12 são apresentadas as trajetórias da frente de enchimento para as três condições iniciais de H/D . A frente de enchimento foi observada em três pontos da seção transversal da adutora: na parte inferior (feição 1), no meio (feição 2) e na parte superior (feição 3). Observou-se, para os dois primeiros casos, que a parte inferior da frente de enchimento tende a propagar mais rapidamente que o topo, de modo que o tamanho da frente aumentava com o tempo.

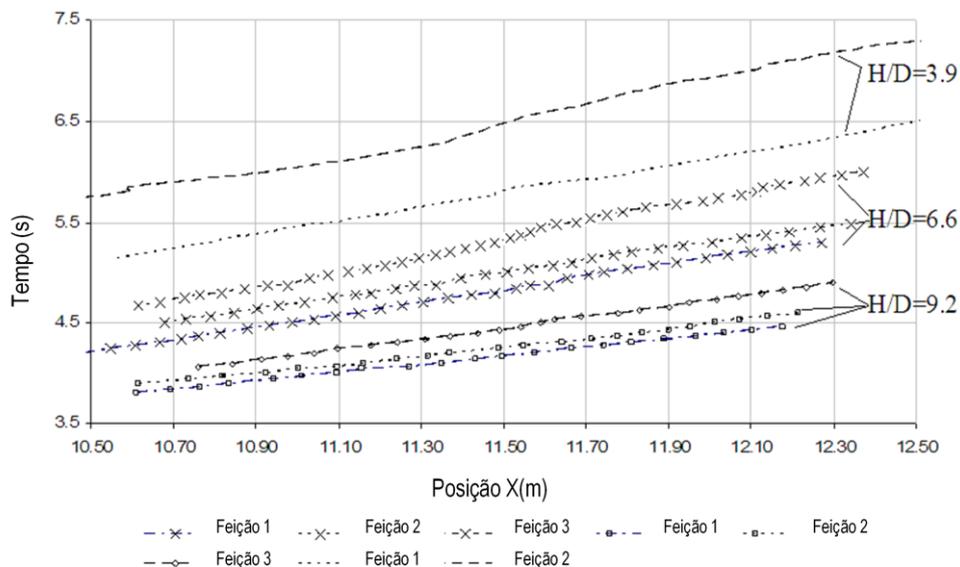


Figura 4.12: Trajetória da frente de enchimento. Adaptado de Guizani *et al.*(2005).

A evolução da pressão na adutora era aferida por transdutores instalados como apresentado na Figura 4.10. Um típico gráfico obtido com as medições é apresentado na Figura 4.13.

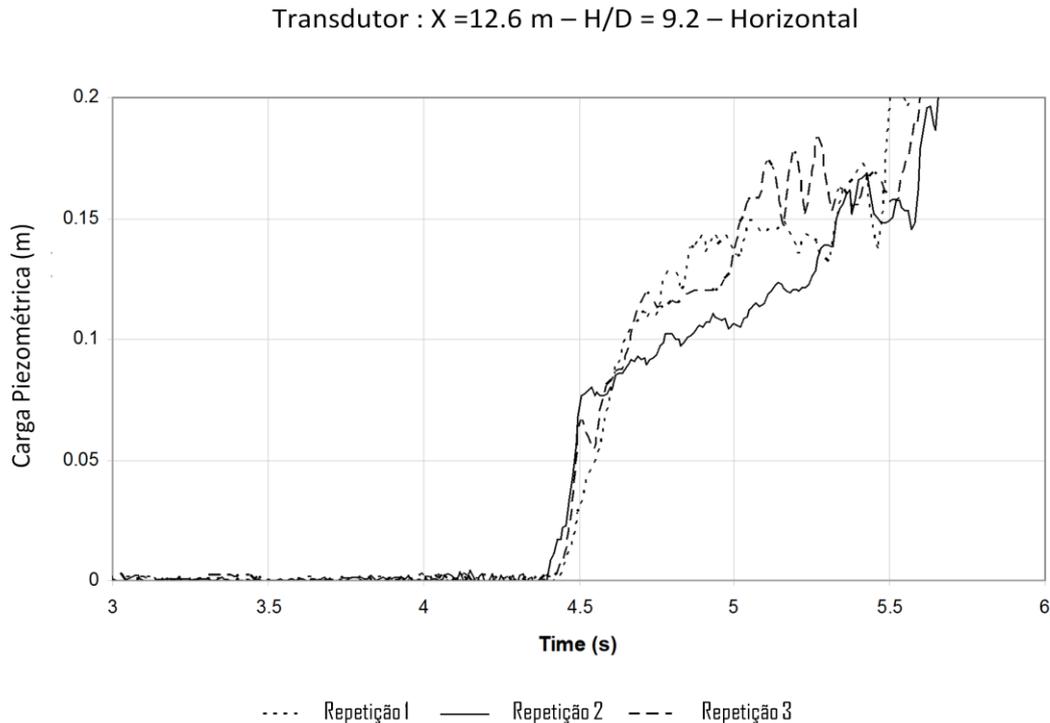


Figura 4.13: Pressão transiente gravado durante experimentos com súbita abertura da válvula, relativa a $H/D = 9,2$. Adaptado de Guizani *et al.*(2005).

Notou-se que a chegada da frente de enchimento, no ponto $X = 12,6$ m, dá-se para $T = 4,4$ s. A partir desse ponto observa-se o aumento da carga decorrente da passagem da frente de enchimento.

O estudo de Guizani *et al.*(2005) concluiu que mesmo em cenários de enchimento rápido, a frente de enchimento em adutoras vazias é similar à observada em eventos de ruptura de barragem. Conclui também que a interface vertical entre ar e água poderia ser uma aproximação razoável caso a frente de enchimento fosse relativamente curta, da ordem de poucos diâmetros. Os autores afirmam que em caso de enchimento gradual de adutoras, a hipótese de interface vertical torna-se inválida, podendo, portanto, esperar uma interface quase horizontal em locais de declividade ascendente e para declividade descendente o escoamento ocorreria em regime livre até onde a água começasse a acumular.

Mais recentemente, uma investigação experimental acerca das interações ar – água foi apresentada por Vasconcelos e Wright (2008) que analisaram um escoamento decorrente de abertura rápida da válvula à jusante de condutos horizontais preenchidos por água. O

estudo enfocou a intrusão de ar em um conduto de acrílico horizontal com 14,1 m de comprimento e diâmetro interno de 94 mm, conectado a um reservatório de nível constante, e a jusante, conectado a uma válvula (Figura 4.14).

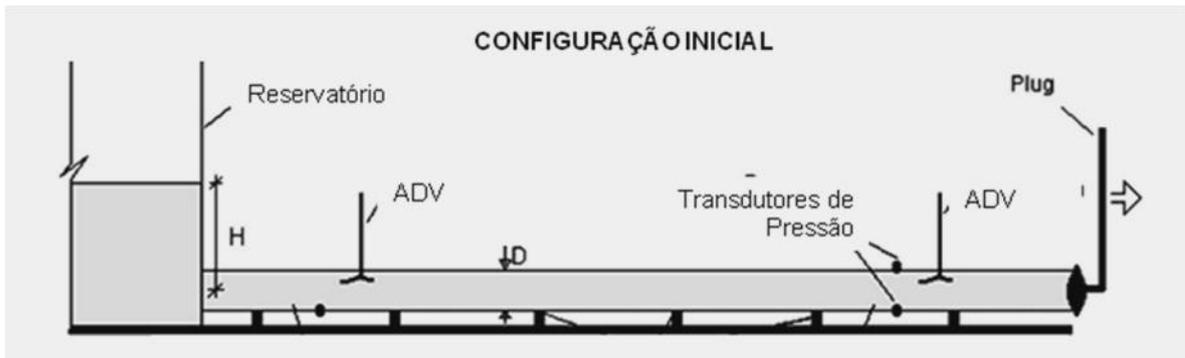


Figura 4.14: Representação do aparato experimental. Adaptado de Vasconcelos e Wright (2008).

O escoamento foi iniciado pela retirada rápida e completa da válvula (Figura 4.15). Na fase inicial do escoamento, ocorreu intrusão de ar. Esse bolsão movia-se para montante enquanto a água continuava a escoar pela parte inferior.

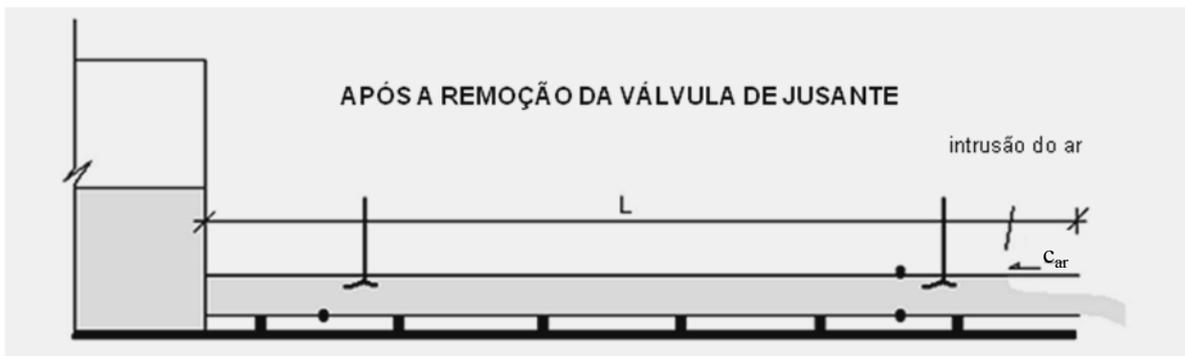


Figura 4.15: Visualização esquemática da intrusão do ar. Adaptado de Vasconcelos e Wright (2008).

A carga inicial do reservatório controlava a taxa de aceleração da água e o avanço limite da intrusão do ar. Essa intrusão ocorria até o momento em que a velocidade da água no conduto fosse suficiente para contê-la.

A velocidade de intrusão do ar foi estimada pela Equação 4.14 baseada na formulação de correntes de gravidades apresentada em Benjamim (1968).

$$c_{ar} = 0.54\sqrt{gD} \quad (4.14)$$

c_{ar} celeridade da intrusão do ar

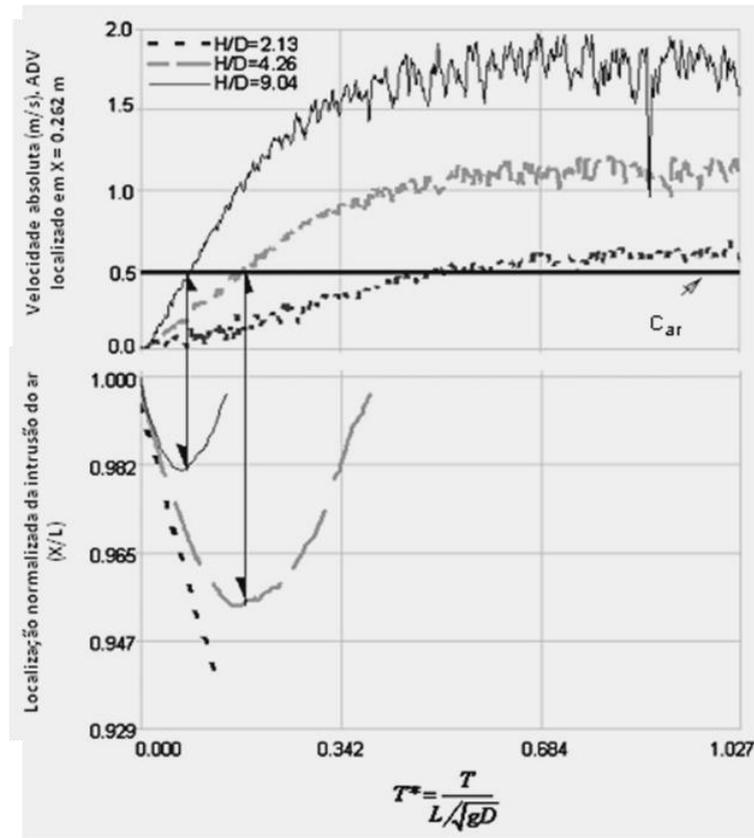


Figura 4.16: Velocidade absoluta do fluxo (U) no ponto $X=0,262\text{m}$ comparada com a velocidade de intrusão do ar (c_{ar}).

Pelo gráfico acima apresentado, nota-se que para: $H/D = 9,04$ o bolsão de ar avançou cerca de 28,2 cm pra montante; $H/D = 4,26$ cerca de 84,6, e ; para $H/D = 2,13$ não foi possível medir o avanço máximo da intrusão. Esse fator fez com que os autores realizassem ensaios para cargas piezométricas ainda menores, como apresentado na Figura 4.17.

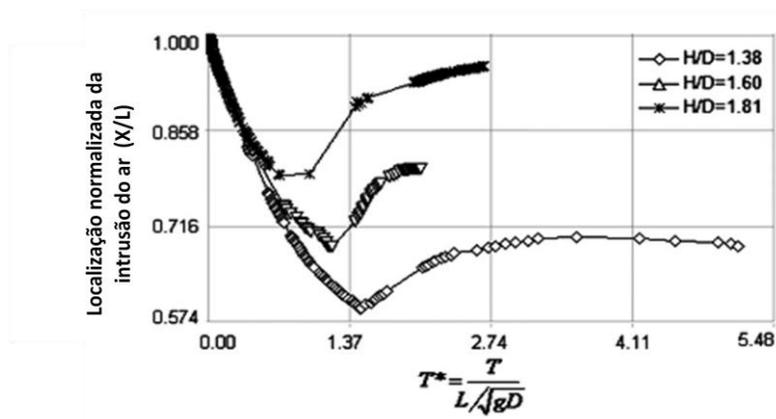


Figura 4.17: Velocidade absoluta do fluxo (U) no ponto $X = 0,262\text{m}$ comparada com a velocidade de intrusão do ar (c_{ar}). Para $H/D:1,38; 1,60$ e $1,81$.

Percebe-se que na menor carga piezométrica ($H/D = 1,81$), a intrusão do ar avançou cerca de 6 m a montante. E em todos os casos apresentados, a entrada de ar sofreu recuo, porém o ar não foi removido da linha.

Os autores indicaram que para adutoras supridas com nível piezométrico elevado, esse ar poderia ser removido a partir da vazão do escoamento (remoção hidráulica). Contudo, para casos onde o suprimento de vazão se desse com cargas piezométricas menores, a intrusão de ar não seria eliminada.

Outra estratégia para modelagem numérica na simulação de enchimento de adutoras é baseada na equação de Saint-Venant. O formato vetorial dessa equação é expresso por:

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad F(\vec{U}) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gh_c A \end{bmatrix} \quad S(\vec{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ gA(S_o - S_f) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

A área transversal do escoamento

h_c profundidade do centróide da seção

S_o declividade do leito do canal

S_f declividade da linha de energia

Um modelo desenvolvido com essa abordagem, identificado como AduTrans foi proposto por Vasconcelos (2007) e tem a capacidade de simular escoamentos tanto no regime pressurizado quanto livre. Tal modelo foi construído com a utilização do Método de Volumes Finitos para resolver uma adaptação das equações de Saint-Venant. O tratamento da transição entre os regimes de escoamento foi feito com modelo conceitual TPA (Vasconcelos *et al.*, 2006). Esse modelo permite simular escoamentos pressurizados sobre-atmosféricos e subatmosféricos uma vez que é adicionado um termo no fluxo do momento da equação de Saint –Venant para considerar uma eventual sobrepressão ou subpressão. O formato vetorial proposto por Vasconcelos *et al.* (2006) é expresso por:

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad F(\vec{U}) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gAh_c + gAh_s \end{bmatrix} \quad S(\vec{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ gA(S_o - S_f) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

A área transversal do escoamento;

A_c área transversal do conduto;

h_c profundidade do centroide da seção;

h_s sobrepressão no escoamento;

S_0 declividade do leito do canal;
 S_f declividade da linha de energia.

O termo h_s representa a principal modificação introduzida nas equações de Saint-Venant, e é referente à sobrepressão no escoamento exclusivo para ocorrência de regimes pressurizados, é calculado por:

$$h_s = \frac{a^2 (A - A_c)}{g A_c} \quad (4.17)$$

a velocidade da onda acústica no regime pressurizado.

O modelo AduTrans não calcula a pressurização dos bolsões de ar, considerando em seu escopo uma ventilação ideal. Essa é a sua limitação, uma vez que em casos reais a ventilação é projetada de maneira empírica e funciona de forma insuficiente.

Vasconcelos (2007) apresenta também, uma simulação de enchimento de adutora. A adutora exemplificada tinha diâmetro equivalente de 668 mm e extensão de 9,680 metros. Esses dados foram oriundos de uma adutora real, e a declividade seguiu também o mesmo caminhamento da adutora real (Figura 4.18).

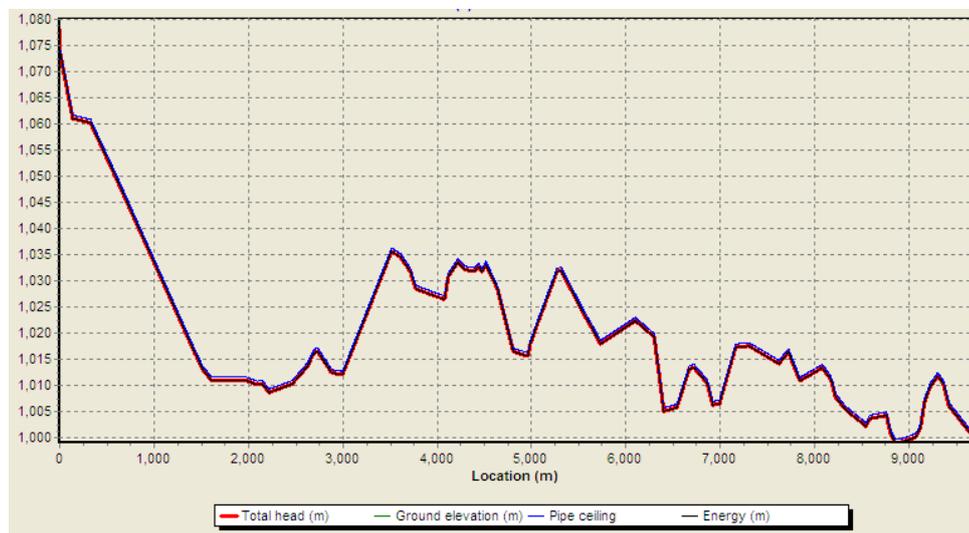


Figura 4.18: Configuração da adutora apresentada pela interface do modelo desenvolvido por Vasconcelos (2007).

Na simulação, considerando reservatórios a montante e a jusante, válvulas e bombas, no instante $T= 581,54$ s teve-se a seguinte situação:

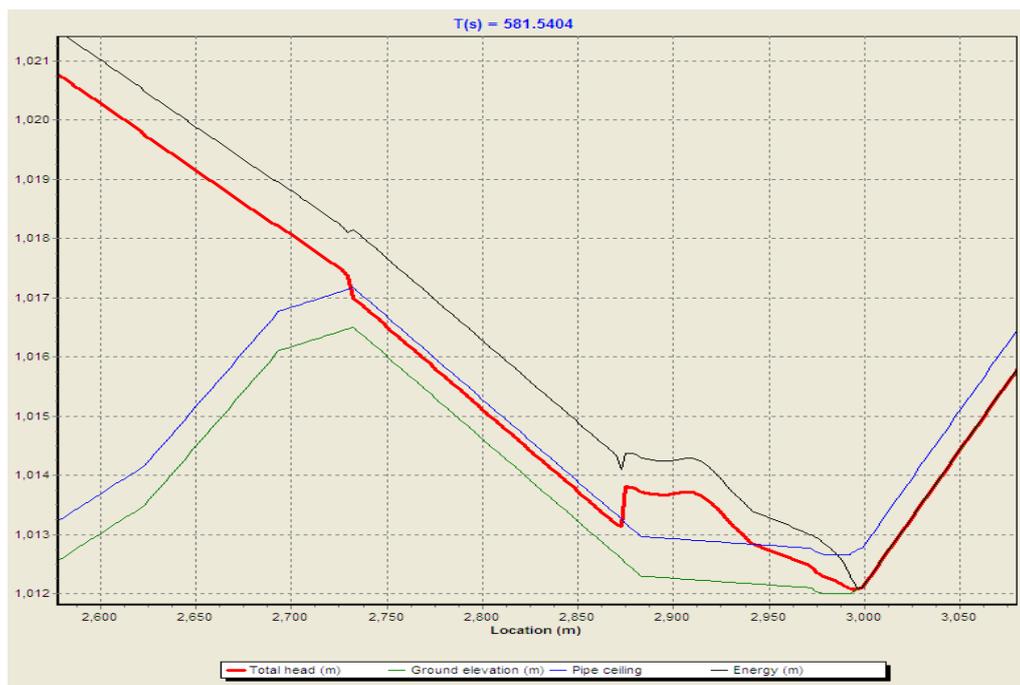


Figura 4.19: Simulação de enchimento da adutora no instante $T = 581,54$ s na interface do modelo desenvolvido por Vasconcelos (2007).

A frente de enchimento, chegando ao ponto elevado, propaga-se em regime livre, devido à forte declividade. Nota-se na figura que a frente de enchimento encontra-se na coordenada 2990 m. Entre $X = 2700$ m e $X = 2900$ m, um bolsão de ar com 150 m de comprimento é também observado. O bolsão é eliminado na simulação à medida que o ressalto hidráulico avança para montante (na direção de outro ponto elevado). Apesar de consistir em um avanço conceitual sobre os modelos em coluna rígida, o modelo apresentado por Vasconcelos (2007) ainda precisa de verificações experimentais para sua confirmação e calibração.

A simulação numérica, subsidiando uns dos objetivos dessa pesquisa, adotou o modelo AduTrans e um modelo baseado no método de Coluna Rígida desenvolvido por Leite (2009).

O modelo computacional desenvolvido por Leite (2009) simula o enchimento gradual assumindo a hipótese de uma interface de avanço aproximadamente horizontal e verificando a possibilidade de pressurização do ar. O modelo se fundamentou no método da Coluna Rígida para descrever o movimento da fase água, método este que é uma simplificação das formulações de escoamento transiente em condutos. A solução numérica adotada para o método da Coluna Rígida foi o método de Runge-Kutta de 4ª ordem.

Para a etapa de enchimento, foi utilizada a equação da Onda Cinemática (Equação 4.18) (Wylie e Streeter, 1993), por ser a alternativa mais simples para cálculo transiente de escoamentos unidimensionais em superfície livre.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + K_c Q^{0,4} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4.18)$$

O fator K_c é definido por:

$$\frac{1}{K_c} = \frac{3}{5} \left(\frac{n_m P^{2/3}}{\sqrt{S_f}} \right)^{3/5} \quad (4.19)$$

n_m coeficiente de rugosidade de Manning;

P perímetro molhado;

t tempo;

A pressurização do ar e a vazão com que escapa pela ventosa foram calculadas conforme o método utilizado na pesquisa de Zhou *et al.* (2002), ora apresentado anteriormente neste presente trabalho.

5 METODOLOGIA

Os ensaios experimentais, acerca das interações entre ar e água em escoamentos de adutoras, foram realizados no modelo em escala reduzida instalado no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília LH / FT / UnB (Figura 5.1), conduzidos entre os meses de novembro de 2009 a janeiro de 2010.



Figura 5.1: Instalações do Laboratório de Hidráulica – UnB.

5.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

O aparato experimental está apresentado esquematicamente na Figura 5.2 e é composto por:

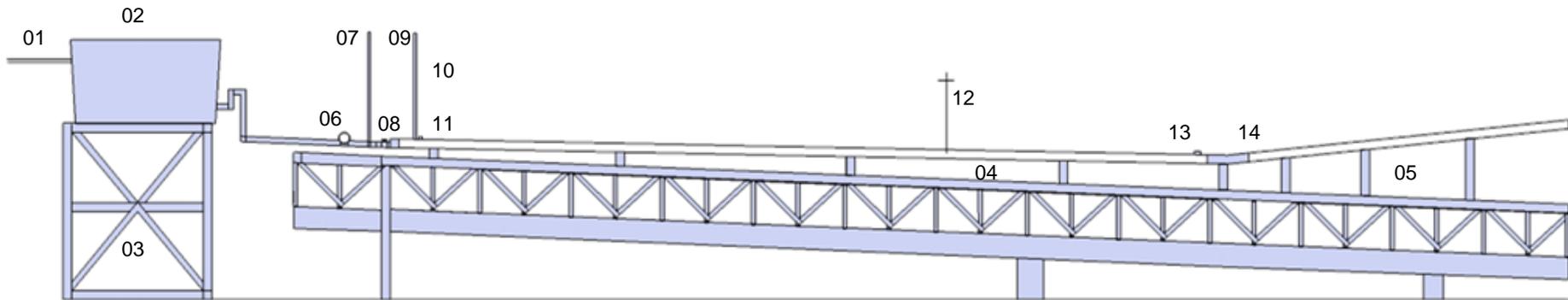


Figura 5.2: Bancada experimental instalada no Laboratório de Hidráulica – UnB. Escala 1:77.

- | | |
|---|--|
| <p>01. Abastecimento conectado a rede local;</p> <p>02. Reservatório de água com volume de 2,0 m³ e área de 2,40 m²;</p> <p>03. Torre com suporte de aço com 2,0 m de altura;</p> <p>04. Trecho I com declividade de 0,024 m/m com 9,406 m;</p> <p>05. Trecho II com declividade adversa de 0,110 m/m com 4,042 m;</p> <p>06. Medidor de vazão;</p> <p>07. Proteção para eventos transientes;</p> | <p>08. Registro em PVC ($X=0,00$ m);</p> <p>09. Orifícios de PVC;</p> <p>10. Torre de acrílico com diâmetro interno de 0,03 m;</p> <p>11. Transdutor piezorresistivo de montante;</p> <p>12. ADV (<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>);</p> <p>13. Transdutor piezorresistivos de jusante;</p> <p>14. Curva de transição da inclinação ($X= 9,270$ m).</p> |
|---|--|

A adutora de acrílico possui um comprimento total de $13,45 \pm 0,01$ metros adotando-se como ponto de referência a posição da válvula ($X = 0,0$ m), diâmetro interno de $0,09$ m e diâmetro externo de $0,10$ m;

Para medidas de vazão foi utilizado medidor tipo roda d'água da Contech série IP81 com indicador CTH 2265i, instalado antes da válvula de referência. As pressões foram mensuradas por transdutores de pressão do tipo piezorresistivo, modelo 8510B-2, com sensibilidade de $17,623$ mV/kPa:

- Transdutor 1 ($X = 0,365$ m) : instalado próximo a torre de ventilação;
- Transdutor 2 ($X = 9,225$ m): instalado a montante da curva.

Os sinais obtidos pelos transdutores eram enviados a placa de aquisição de dados – *National Instruments LabVIEW SignalExpress* versão 2.5 - conectada a um computador. As velocidades foram medidas com um medidor Micro-ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) da SonTek numa frequência de 20 Hz ($X = 6,395$ m), que também transferia os sinais para uma placa conectada ao computador. Os ensaios foram gravados por câmeras digitais com capacidade de captar 30 imagens por segundo em suas filmagens.

5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta pesquisa simulou escoamentos bifásicos em um modelo reduzido de adutora para análise da influência da ventilação no escoamento. Para esse evento, foi necessária a alteração na vazão média de entrada e no grau de ventilação propiciado com a tubulação inicialmente sem água.

A vazão média admitida na adutora era controlada pelo grau de abertura do registro assumindo os valores de $0,8$, $1,4$ e $2,0$ L/s que correspondem aos respectivos valores adimensionais de vazão (Q^*) $0,10$, $0,20$ e $0,30$.

O grau de ventilação da adutora era associado à razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro do conduto (D_o/D), para esta pesquisa foram adotados três valores apresentados por Zhou *et al.*, (2002) em sua análise de escoamento transiente em enchimento rápido de tubos horizontais contendo ar aprisionado.

- D_o/D próximo a $0,086$: Orifício com diâmetro de 8 mm;

- $0,086 < D_o/D < 0,2$: Orifício com diâmetro de 16 mm;
- $D_o/D > 0,2$: Orifício com diâmetro de 24 mm.

Os orifícios foram confeccionados em PVC e instalados na parte superior da torre de ventilação.

Em síntese, o arranjo experimental compreendeu:

Tabela 5.1: Arranjo experimental.

Parâmetro	Faixa de teste
Vazão: Q (m ³ /s)	0,0020; 0,0014 e 0,0008.
Ventilação: D_o (m)	0,024; 0,016 e 0,008

Tabela 5.2: Arranjo experimental com valores adimensionais.

Parâmetro	Faixa de teste
Vazão: $Q^* = Q / \sqrt{g \cdot D^5}$	0,30; 0,20 e 0,10,
Ventilação: $D^* = D_o/D$	0,27; 0,18 e 0,09

A tubulação era conectada a um reservatório ligado à rede de abastecimento local. O volume do reservatório era mantido pelo acionamento da boia instalada, para que no intervalo de tempo do experimento a alteração do nível não fosse significativa. A vazão de entrada de cada ensaio foi controlada pelo grau de abertura do registro de PVC instalado logo após o medidor de vazão. A diferença de cota entre o nível do reservatório e a parte mais baixa da adutora é de 1,295 m, o que corresponde a uma carga de $H/D = 1,44$, um valor considerado pequeno quando comparado às pesquisas citadas anteriormente, porém relevante quando comparado aos dados de adutoras reais. Dado o início do escoamento, quando no ponto mais baixo do conduto ocorria a formação do ressalto hidráulico, acompanhava-se a eliminação do bolsão de ar. Após essa remoção, aguardava-se o extravasamento na outra extremidade e o estabelecimento do regime permanente para então finalizar o ensaio.

O procedimento consistiu em uma corrida experimental com as seguintes etapas:

- Acionamento da câmera digital;
- Registro na gravação da data, da hora do início do experimento e do número do ensaio;
- Acionamento do transdutor de pressão e posteriormente do medidor *ADV*;

- Abertura da válvula, leitura da vazão e observação do escoamento até que o ar incorporado fosse removido;
- Leitura dos piezômetros de montante e de jusante após o escoamento atingir a condição de permanente e uniforme;
- Fechamento da válvula, desativação do *ADV*, posteriormente do transdutor de pressão e;
- Desativação da câmera.

Cada corrida experimental foi repetida no mínimo por três vezes, perfazendo mais de vinte e sete corridas experimentais. Os dados obtidos nessas corridas foram transferidos para planilhas eletrônicas e submetidos à verificação de inconsistências. Essa verificação compreendia avaliação superficial dos dados disponibilizados nas planilhas e plotados em gráficos. Também foram realizados ensaios prévios para visualizar um padrão de aferição por parte dos transdutores e do *ADV*. Assim, quando o padrão visualizado do ensaio diferia daquele padrão esperado, um novo ensaio era realizado.

5.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Após a realização dos ensaios e a avaliação dos dados experimentais, foi efetuada a simulação numérica em dois programas. Como através dos experimentos constatou-se que para ensaios com ventilação máxima, a pressurização do ar não ocorria, utilizou-se o modelo AduTrans, visto que esse modelo adota a ventilação ideal e conseqüentemente a não pressurização do ar. Nos demais ensaios, percebeu-se pressurização em diferentes graus e, portanto, a simulação numérica desses utilizou o programa elaborado por Leite (2009). Para a comparação entre os dados experimentais e numéricos, foram observados os efeitos mais significativos do ensaio, como tempo gasto para: início da pressurização, eliminação do ar e enchimento da adutora ou extravasamento.

O modelo AduTrans desenvolvido por Vasconcelos (2007) usa técnicas numéricas em dinâmica dos fluidos computacional numa formulação transiente que permite simular transições entre regimes de escoamento bem como a formação de ondas de choque (ressaltos) com o mínimo de difusão numérica. Para esta pesquisa, adotaram-se os dados

experimentais para a interface do programa, respeitando comprimentos e declividades. A única alteração relevante trata-se do reservatório de montante, que no caso do modelo possuía uma área superficial de 50 m², a fim de representar um nível constante, depois de iniciado o escoamento. O parâmetro de entrada específico para os três cenários trabalhados é o grau de abertura da válvula. Os dados de entrada encontram-se listados na Tabela a seguir:

Tabela 5.3: Parâmetros de entrada para o modelo AduTrans.

Parâmetro	Valores
Reservatório de montante	Cota de 2,830 m e área superficial de 50 m ² .
Reservatório de jusante	Cota de 1,970 m e área superficial de 50 m ² .
Válvula	Tipo borboleta, diâmetro de 50 mm e com grau de abertura final de 23%, 36% e 60%.
Conduto - Trecho 1	Comprimento de 9,406 m, diâmetro de 90 mm, declividade de 0,0238 m/m e coeficiente de Manning igual a 0,010.
Conduto - Trecho 2	Comprimento de 4,042 m, diâmetro de 90 mm, declividade de - 0,1012 m/m e coeficiente de Manning igual a 0,010.

O modelo de Leite (2009) é um modelo numérico para enchimento gradual de adutoras, que considera uma interface de enchimento mais adequada e a pressurização do ar. Nessa ênfase, ele usou o Método da Coluna Rígida para solucionar um sistema de equações diferenciais ordinárias, as quais representam o avanço de uma interface de enchimento quase horizontal. Já a pressurização do ar e a vazão que escapa pela ventosa foram calculadas conforme o método apresentado na pesquisa de Zhou *et al.* (2002). Os parâmetros adotados para simulação no modelo (Tabela 5.4) também representam os aspectos de instalação do aparato experimental e como dado específico de cada ensaio eram colocados a somatória das perdas de cargas que provocasse a vazão desejada e o respectivo diâmetro do orifício para ventilação.

Tabela 5.4: Parâmetros de entrada para o modelo de Leite (2009).

Parâmetro	Valores
Carga do Reservatório	1.02 m
Comprimento do trecho 1	9,406 m
Comprimento do trecho 2	4,042 m
Diâmetro do conduto	0,09 m
Diâmetro do orifício	0,008 m, 0,016 m e 0,024 m
Inclinação em graus - trecho 1	1,13
Inclinação adversa em graus - trecho 2	5,54
Coefficiente politrópico	1,2
Fator de atrito	0,012
Somatório das perdas de carga	3,55 m.c.a, 4,25 m.c.a. e 5,80 m.c.a.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em uma abordagem geral pôde-se observar nos escoamentos ensaiados a interferência da presença do ar na pressão e vazão de acordo com a ventilação propiciada à adutora. Esse trabalho tem como proposta avaliar os efeitos dessa interface ar – água considerando como variáveis a vazão e o grau de ventilação. Os efeitos avaliados compreendem o tempo de interação entre a interface ar e água até a expulsão do ar na adutora, o tempo transcorrido para o extravasamento ou enchimento da adutora, a carga de pressão de operação no regime permanente e a pressurização média do ar.

Em todos os ensaios, notou-se, inicialmente, que o escoamento ocorria em regime supercrítico, uma frente quase horizontal. Na mudança de declividade ocorria à formação do ressalto hidráulico e nessa interface distinguiam-se duas colunas de água, a coluna de enchimento trafegando para jusante e a coluna retrógrada, essas transportando vazões distintas.

A vazão de entrada era constatada pelo medidor de vazão. A vazão da frente de enchimento foi determinada com dados fornecidos pelo transdutor de jusante através da determinação da velocidade média baseada na diferença de carga sobre o respectivo intervalo de tempo. Com efeito, a vazão retrógrada foi determinada pela diferença entre as duas vazões anteriores.

Com o ressalto hidráulico trafegando para montante, atentou-se para o tempo necessário para o início da pressurização na parte mais baixa do conduto. Utilizou-se esse termo para fazer referência de quando a carga de pressão nesse local fosse de $H/D > 1$, associado ao regime em conduto forçado.

A coluna retrógrada eliminava o bolsão de ar pela torre de ventilação. O tempo utilizado e a existência ou não da pressurização do ar foram observados. Foram adotados como referência de pressurização do ar, os valores equivalentes medidos pelo transdutor de montante iguais ou maiores que $0,1D$.

Com o ar eliminado, esperou-se o extravasamento pela outra extremidade informando o enchimento da adutora. Com o conduto preenchido, a vazão no estado permanente foi calculada com os dados oriundos do *ADV*.

Quanto aos instrumentos utilizados, os erros associados à medição são listados a seguir:

- Vazão – medidor tipo roda d'água: $\pm 0,00005 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Velocidade – medição com *ADV*: $\pm 0,02 \text{ m/s}$;
- Pressão – medição com transdutor: $\pm 0,004 \text{ m.c.a.}$;
- Tempo – acompanhado pelos registros do transdutor: $\pm 0,005 \text{ s}$;
- Tempo – registrado pela gravação digital: $\pm 0,5 \text{ s}$.

6.1.1 Ensaio experimental com $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$:

No primeiro momento, o escoamento ocorreu em regime livre, com vazão de entrada de $0,00207 \pm 0,00005 \text{ m}^3/\text{s}$. Encontrando a inclinação adversa, antes mesmo de fechar a seção de escoamento, ocorreu a formação do ressalto hidráulico que se movia para montante. Por volta de $T^* = 1,070 \pm 0,001$ ($15,300 \pm 0,005 \text{ s}$) o regime passa a ser pressurizado na parte mais baixa da tubulação (Figura 6.2). Nesse momento a vazão fornecida à adutora é em parte utilizada para o avanço da frente de enchimento e em parte retorna para montante. Cerca de 70% da vazão retrocede para expulsão do ar e preenchimento do conduto a montante. O restante da vazão de entrada é utilizado pela frente horizontal de enchimento. Nesse ensaio, observou-se que não houve pressurização do ar, propiciando assim uma ventilação adequada.

A coluna de água que trafega para montante, depois da sua formação, leva $1,19 L.(gD)^{-1/2}$ ou 17,03 segundos ($T^* \approx 2,260 \pm 0,001$; $T \approx 32,34 \pm 0,005 \text{ s}$), para chegar a torre de ventilação (Figura 6.1). Nesse instante, foi observada a maior variação de pressão chegando ao valor médio de $H^* = 6,2 \pm 0,2$. O volume de ar removido é aproximadamente de $0,0025 \pm 0,0001 \text{ m}^3$.

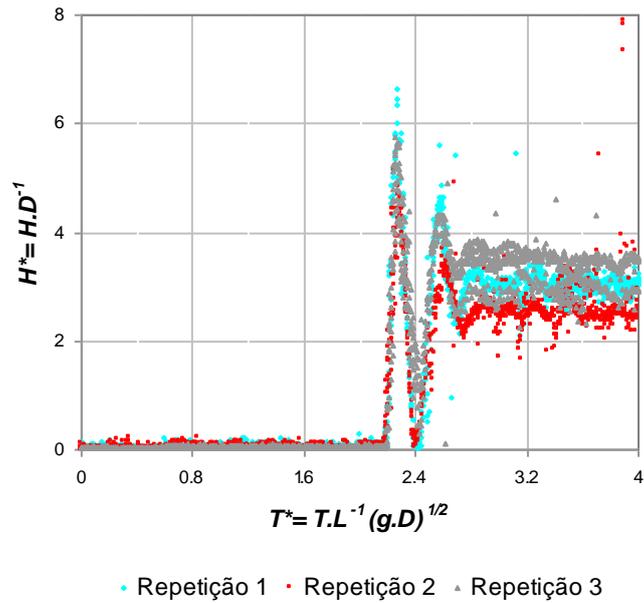


Figura 6.1: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$.

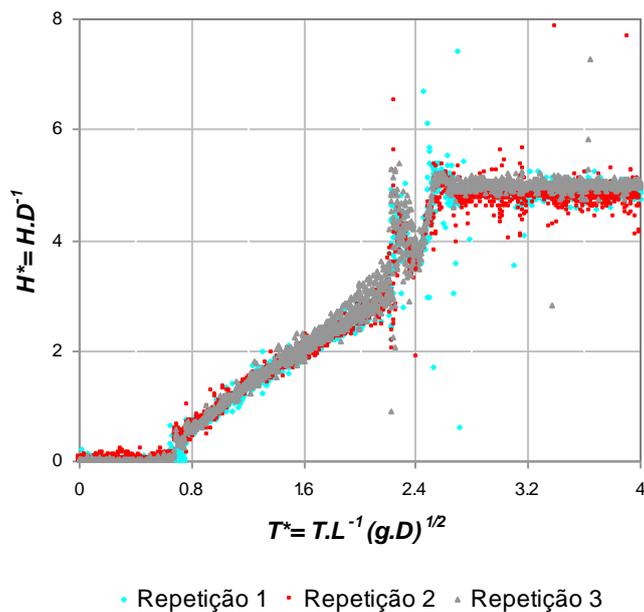


Figura 6.2: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$.

O extravasamento é posterior à eliminação do bolsão de ar e ocorre aos $T^* \approx 2,400 \pm 0,001$ ($T = 34,35 \pm 0,005$ s), 2 segundos após a expulsão do ar. O acréscimo na velocidade, na ordem de cinco vezes (Figura 6.3) o valor inicial de $0,09(gD)^{1/2}$ m/s, e é percebida após $0,19 L.(gD)^{-1/2}$ ou 2,7 segundos ($T^* = 2,46$; $T = 35,20$ s) dada a expulsão do ar. A velocidade do escoamento, após o extravasamento inicial, tende a se estabilizar em um

valor médio menor que $V^* = 0,30 \pm 0,02$ ou $0,32 \pm 0,02$ m/s, sob a carga de $H/D = 4,89 \pm 0,06$. A vazão estabilizou-se em $0,0020 \pm 0,0001$ m³/s. Os ensaios apresentaram pequenos bolsões estacionados ao longo da tubulação, quando o escoamento atingiu o estado permanente.

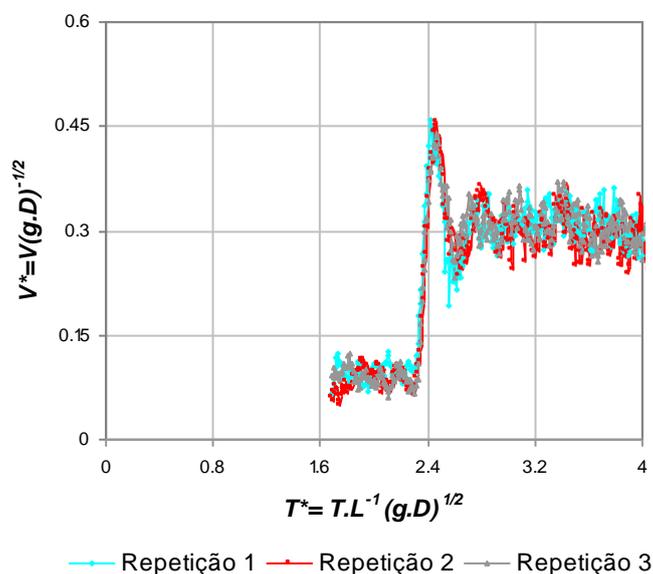


Figura 6.3: Medições do ADV- $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$.

Os erros experimentais associados às medidas realizadas e às propagações de erro foram citados neste presente tópico e assumem os mesmos valores para os demais ensaios. Por conveniência, os resultados a seguir são apresentados respeitando a margem de erro para facilitar a leitura e para efeitos comparativos.

6.1.2 Ensaio experimental com $Q^* = 0,30$ e $D^* = 0,18$:

Com vazão de entrada de $2,18 \cdot 10^{-3}$ m³/s, o escoamento livre no conduto ocorreu até encontrar a inclinação adversa, resultando na formação de um ressalto hidráulico. A pressurização, na parte mais baixa da adutora, é percebida em $T^* = 0,94$ (13,45 s) cerca de 2,0 segundos mais cedo quando comparado ao ensaio anterior. Esta pequena diferença era esperada, pois se percebe na Figura 6.4 que houve uma leve pressurização média do ar de $H/D = 0,19 \pm 0,04$ iniciada em $T^* = 0,51$ (7,30 s).

Cerca de 71% da vazão de entrada retrocede para expulsão da cavidade de ar, levando $1,24 L.(gD)^{-1/2}$ ou 18,0 segundos ($T^* \approx 2,18$; $T \approx 31,20$ s) para atingir a torre. Observa-se que, em relação ao ensaio com diâmetro máximo, o ressalto chega à torre 1,0 s mais cedo,

embora o tempo de interação da interface ar e água nos dois ensaios sejam praticamente o mesmo. O volume de ar removido foi de $27,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

O ressalto era acompanhado por um *slug flow*. Atingindo a torre, o acréscimo de pressão alcançou o valor de $H^*=6,1\pm 0,2$ não apresentando diferença quando comparado ao pico do ensaio anterior.

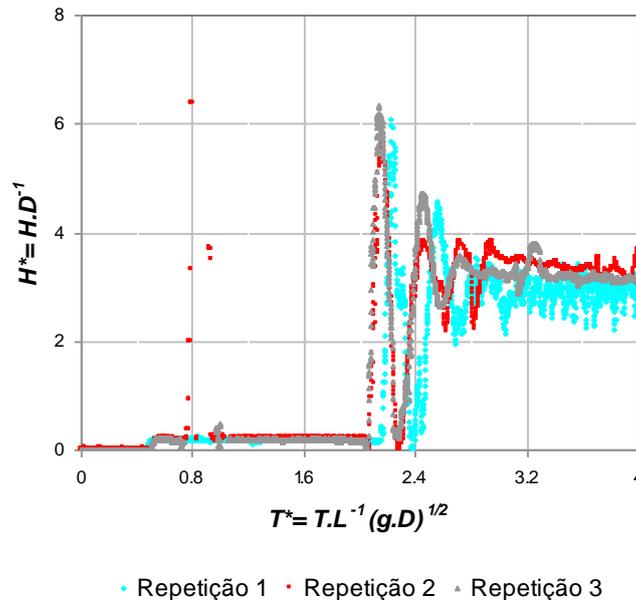


Figura 6.4: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,18$.

O extravasamento ocorreu aos $T^* = 2,58$ (36,90s), cerca de $T^* = 0,40$ ou 5,7 s após a remoção do ar. Comparado a primeiro ensaio, o enchimento da adutora ocorreu cerca de 3,0 s mais tarde.

Depois do ar eliminado, a velocidade chegou ao valor máximo de $V = 0,48 (gD)^{1/2} \text{ m/s}$ aos $T^* = 2,40$ (34,30 s), cinco vezes maior que a velocidade inicial de $V = 0,09 (gD)^{1/2} \text{ m/s}$ no respectivo ponto onde o ADV encontra-se instalado (Figura 6.6). Após o extravasamento, a velocidade média estabilizou-se em $V = 0,31(gD)^{1/2} \text{ m/s}$, três vezes o valor da velocidade correspondendo a vazão de $2,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. O escoamento em regime permanente encontrou-se sob a carga de $H^* = 4,83\pm 0,2$ (Figura 6.5).

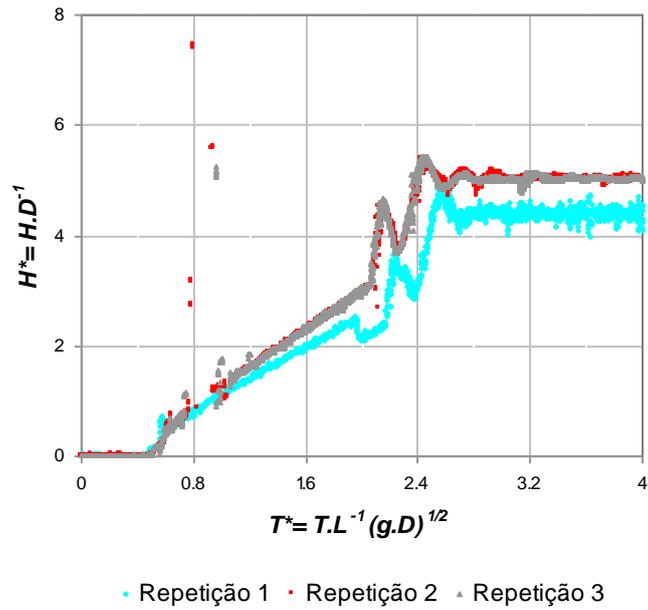


Figura 6.5: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,18$.

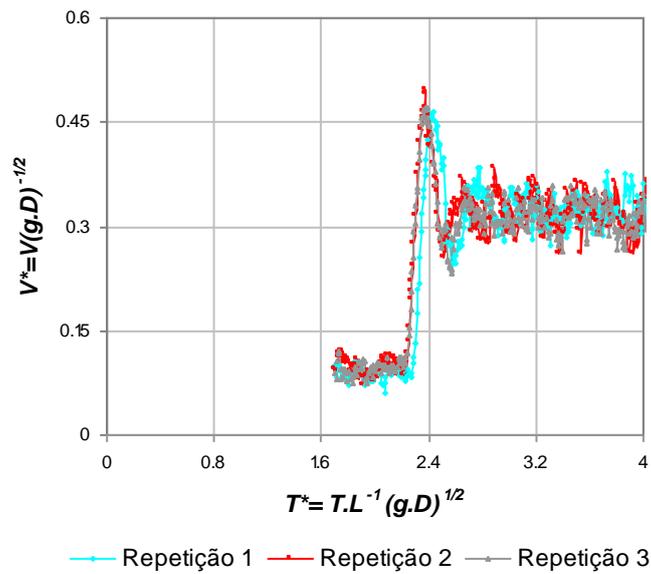


Figura 6.6: Medições do ADV- $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,18$.

6.1.3 Ensaio experimental com $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$:

A frente de enchimento com vazão de $2,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ seguiu em regime livre e ao encontrar a inclinação adversa, formou um ressalto que trafegava para montante. A pressurização na parte baixa do escoamento iniciou-se aos $T^* = 0,91$ (13,03 s), 2,3 s mais cedo comparado

ao primeiro ensaio e menos de meio segundo comparado ao ensaio anterior. No referido intervalo, cerca de 68% da vazão fornecida, foi utilizada para remoção do ar. Nesse ensaio percebeu-se uma considerável pressurização do ar, iniciada por volta de $T^*=0,6$ ou $8,6$ s e com pressurização média, de $H/D = 1,13 \pm 0,05$ (Figura 6.7). A coluna retrógrada chegou a torre de ventilação depois de $1,58 L.(gD)^{-1/2}$ ou $22,61$ s ($T^* \approx 2,49$; $T \approx 35,64$ s), esse foi o caso que mais demorou à chegada na torre, comparativamente $3,3$ s mais tarde em relação ao ensaio com maior diâmetro de ventilação e $4,3$ s mais tarde que o ensaio anterior. Tal diferença deve-se ao fato da resistência oferecida pela pressurização do bolsão de ar a frente retrógrada. O volume de ar removido foi de $31,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

O extravasamento ocorreu $1,86$ s ($T^* \approx 2,62$; $T \approx 37,50$ s) após a eliminação do ar. Gastou mais de $3,0$ s referente ao primeiro ensaio e cerca de $0,5$ s em comparação ao ensaio anterior.

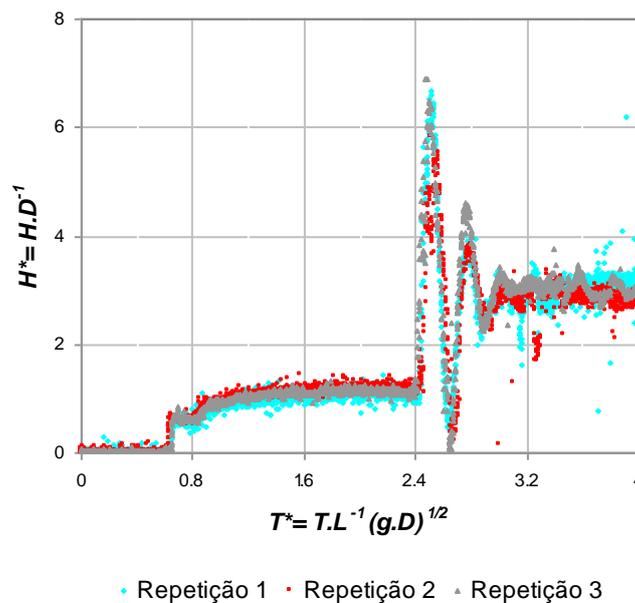


Figura 6.7: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$.

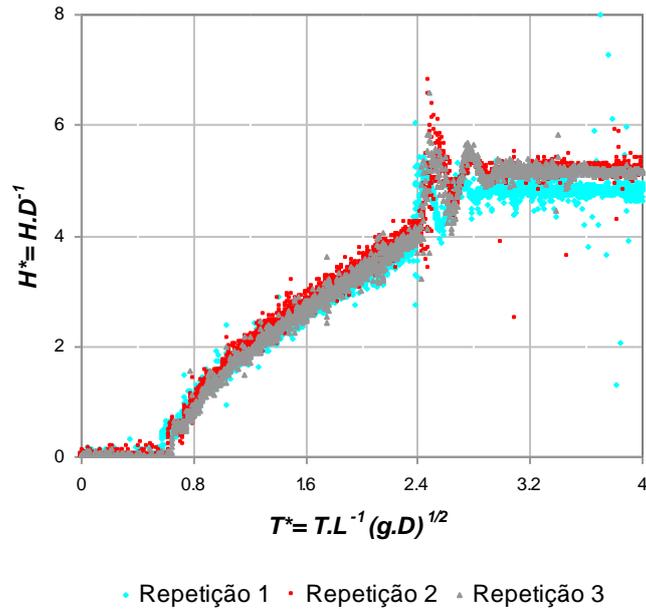


Figura 6.8: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$.

O pico de pressão chegou à ordem de $H^*=6,4\pm 0,3$, apresentando um aumento de 4% comparado ao primeiro ensaio e de 7% comparado ao ensaio anterior. Nesse ensaio, pode ter ocorrido a compressão do ar para sua respectiva eliminação, justificando essa diferença de pressão.

A velocidade, após a remoção do ar chegou a $V=0,44(gD)^{1/2}$ m/s aos $T^*=2,65$ (37,93s), assumindo valor 4,7 vezes maior que a velocidade média inicial de $V=0,09(gD)^{1/2}$ m/s (Figura 6.9). Após o extravasamento, a velocidade passa a se estabilizar com valor médio de $V=0,30(gD)^{1/2}$ m/s, três vezes o valor médio inicial e correspondente a vazão de $2,03 \cdot 10^{-3}$ L/s. O escoamento estabilizou-se sob a carga de $H^*=5,1\pm 0,1$. (Figura 6.8).

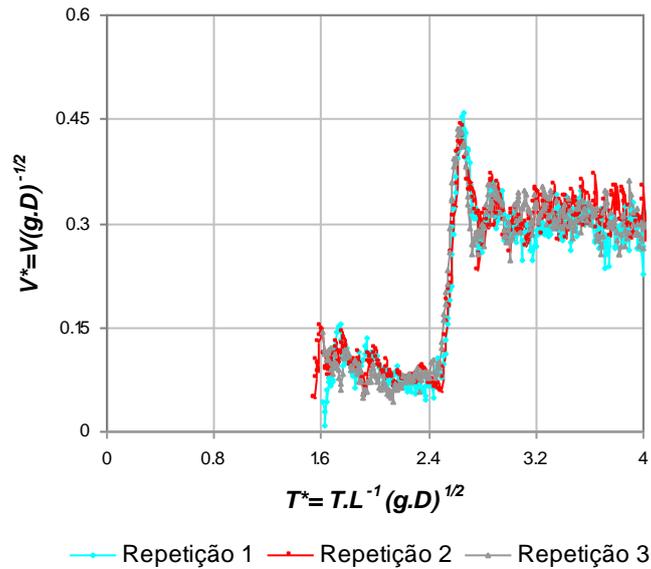


Figura 6.9: Medições do ADV- $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,09$.

Para os ensaios de máxima vazão, notou-se que quanto menor o diâmetro, mais cedo se iniciava a pressurização na parte inferior do conduto, e mais suscetível ele estava à ocorrência da pressurização do ar. Observou-se que para expulsão do ar, a frente retrógrada compreendia uma vazão média de $1,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, cerca de 70% da vazão de entrada. A interação ar e água, até a chegada à torre foi de maior duração para o ensaio com o menor diâmetro, uma diferença de 5,6 segundos em comparação ao ensaio com o diâmetro máximo, e 4,9 s com o diâmetro intermediário. Isso se deve a presença do bolsão de ar pressurizado fornecendo resistência à coluna retrógrada.

O enchimento da adutora acontece mais cedo para o diâmetro maior, cerca de 3,2 s antes quando comparado ao ensaio de menor diâmetro e 2,6 s comparado ao ensaio de diâmetro intermediário. A vazão do estado permanente não sofreu redução significativa quando comparada à vazão inicial de entrada.

6.1.4 Ensaio experimental com $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$:

O escoamento, com vazão de entrada de $1,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, encontrou a inclinação adversa, formando o ressalto hidráulico seguido de um *slug flow*, ambos movendo-se para montante.

Por volta de $T^* = 1,46$ (20,90 s) (Figura 6.11) o regime passa a ser pressurizado na parte mais baixa da tubulação e cerca de 74% da vazão de entrada retrocede para expulsão do ar e preenchimento do conduto. Observou-se que não houve pressurização significativa do ar, portanto ocorreu uma adequada ventilação. O volume estimado de ar removido foi de $26,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

A coluna de água leva $1,82 \text{ L} \cdot (\text{gD})^{-1/2}$ ou 26,05 s ($T^* \approx 3,28$; $T \approx 46,94\text{s}$), para chegar a torre de ventilação (Figura 6.10), repercutindo na maior variação de pressão chegando a ordem de $H^* = 4,1 \pm 0,4$. A velocidade atingiu dois picos: o primeiro aos $T^* = 3,61$ (51,67s) com $V = 0,25(\text{gD})^{1/2} \text{ m/s}$ e o segundo aos $T^* = 3,86$ (55,24) com $V = 0,27(\text{gD})^{1/2} \text{ m/s}$.

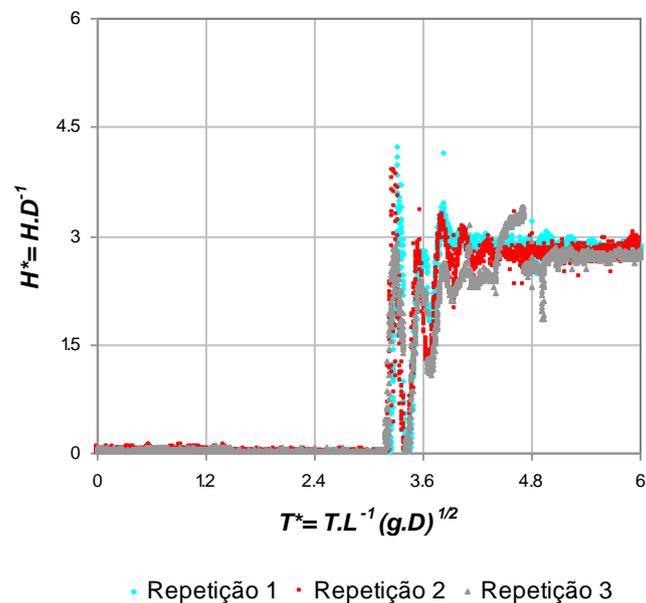


Figura 6.10: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$.

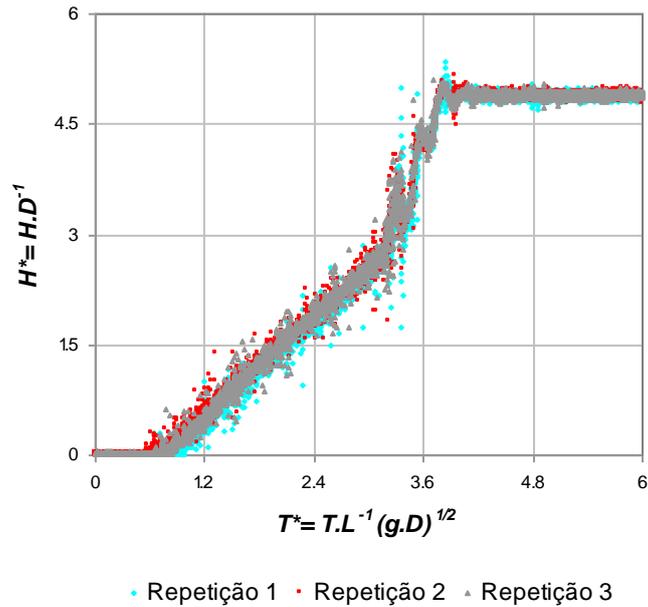


Figura 6.11: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$.

Com 57,96 s ($T^*=4,05$) ou 11,0 s após a remoção do ar, o extravasamento ocorreu e a velocidade estabilizou-se em $V= 0,21 L.(gD)^{1/2}$ (Figura 6.12). Essa velocidade foi superior 3,7 vezes o valor da velocidade média inicial de $V= 0,06 L.(gD)^{1/2}$ e é correspondente a vazão de $1,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Na Figura citada e nos demais gráficos com as medições do ADV exclusivos da vazão intermediária, observou-se um decaimento na velocidade do escoamento. Tal fato ocorreu, uma vez que os ensaios com essa vazão demandam um tempo maior de realização coincidindo assim com a diminuição do nível do reservatório. Nível esse, que no intervalo em questão, não teve por todo período do ensaio um reabastecimento suficiente. Porém, como se pode inferir, esse fator não teve influência nas análises dos resultados.

O escoamento estabilizou-se sob a carga de $H^*= 4,89 \pm 0,01 \text{ m.c.a.}$ com a presença de bolsões discretos estacionados ao longo do conduto, com diâmetro médio de 0,05 m.

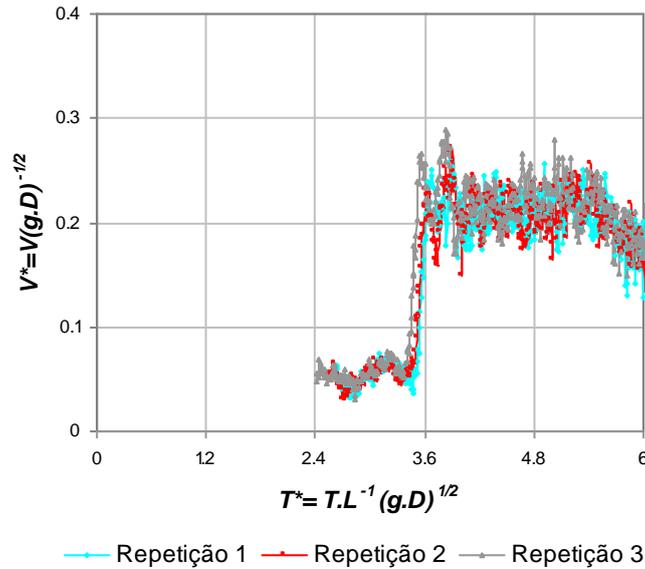


Figura 6.12: Medições do ADV- $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$.

6.1.5 Ensaio experimental com $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$:

A vazão de entrada foi de $1,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ com escoamento inicial em regime livre. Essa interface formou um ressalto hidráulico que trafegou para montante, seguido por um *slug flow*.

Aos 19,03 s ($T^* = 1,33$) o regime torna-se pressurizado na parte mais baixa da adutora (Figura 6.14), 1,9 s mais cedo comparado ao ensaio anterior, com 71% da vazão retrocedendo para preencher o conduto e expulsar o ar. Nesse intervalo percebeu-se uma leve pressurização do ar com carga média de $H^* = 0,16 \pm 0,04$. O restante da vazão de entrada seguiu na frente horizontal de enchimento.

A frente retrógrada usou $1,93 \text{ L} \cdot (\text{gD})^{-1/2}$ ou 27,5 s ($T^* \approx 3,25$; $T \approx 46,51 \text{ s}$) para chegar a torre de ventilação (Figura 6.13), nesse momento percebeu-se a maior variação de pressão da ordem de $H^* = 3,8 \pm 0,2$. Embora, a remoção do ar tenha ocorrido quase no mesmo instante que no ensaio anterior, nesse ensaio o tempo de interação entre ar e água é cerca de 1,9 s maior, visto que houve uma pequena pressurização do ar. O pico de pressão foi 6% menor, devido ao efeito de amortecimento do ar. A estimativa do volume de ar removido foi de $27,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

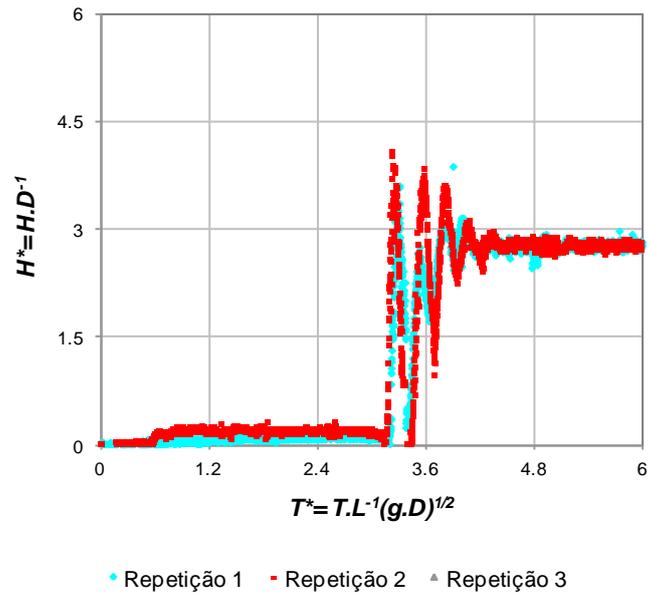


Figura 6.13: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$.

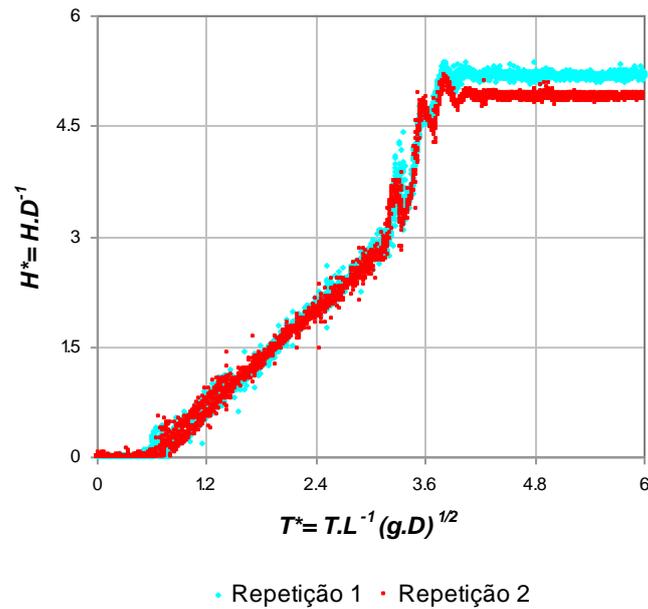


Figura 6.14: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$.

A velocidade chegou ao valor máximo de $V = 0,28(gD)^{1/2}$ m/s aos $T^*=3,57$ (51,45 s), 4,7 vezes maior que a velocidade inicial de $0,06 (gD)^{1/2}$ m/s (Figura 6.15) no ponto em que o ADV encontrava-se instalado. O extravasamento ocorreu aos $T^*=4,12$ (59 s), 12,2 s após a remoção e apenas 1,20 s a mais referente ao ensaio anterior. O escoamento estabilizou-se com velocidade de $V=0,21(gD)^{1/2}$ m/s, 3,6 vezes o valor da velocidade média inicial e sob

a carga de $H^*=5,0\pm 0,1$ (Figura 6.14). A vazão estabilizou-se em $1,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, apesar de ser 5% maior que a vazão inicial, o valor está dentro do intervalo de erro.

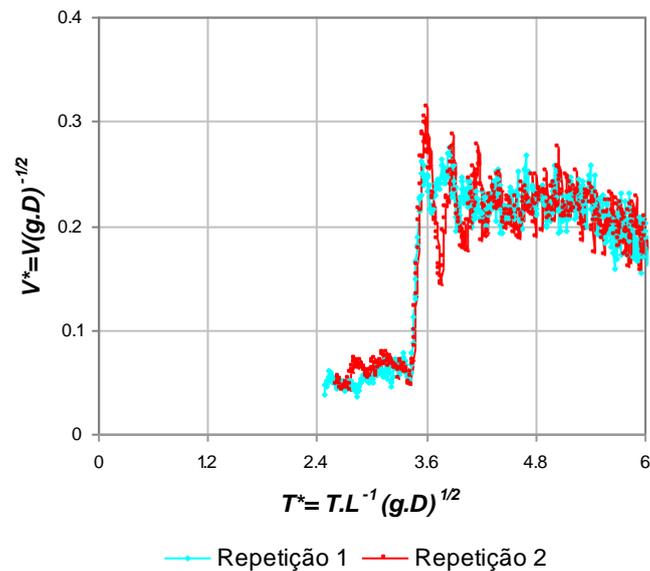


Figura 6.15: Medições do ADV- $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$.

6.1.6 Ensaio experimental com $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$:

O escoamento iniciou-se em regime livre com vazão de entrada de $1,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, formando um ressalto hidráulico ao encontrar a inclinação adversa.

Por volta de $T^* = 1,05$ (15,03 s) o regime passa a ser pressurizado na parte mais baixa da tubulação (Figura 6.17), 4,0 s mais cedo em relação ao ensaio anterior e 5,9 s em relação ao ensaio de maior diâmetro. Nesse momento, 73% da vazão fornecida à adutora retrocedem. Notou-se a pressurização do ar iniciada por volta de $T^* = 0,69$ (9,87 s) com valor médio de $H^*=1,21\pm 0,04$.

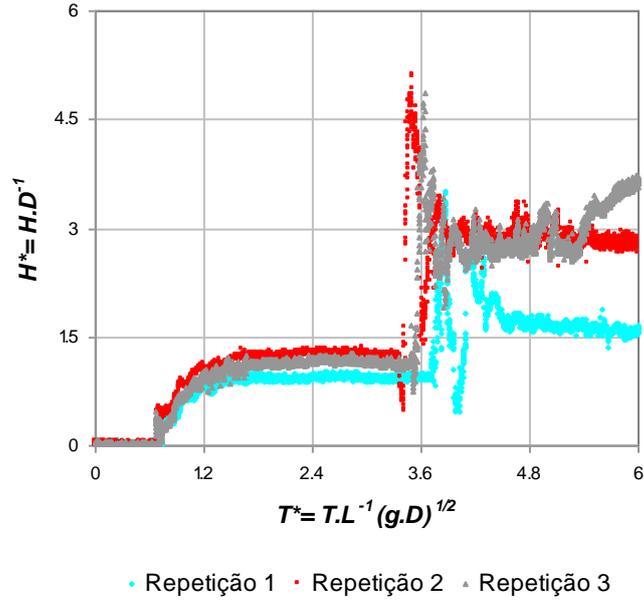


Figura 6.16: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$.

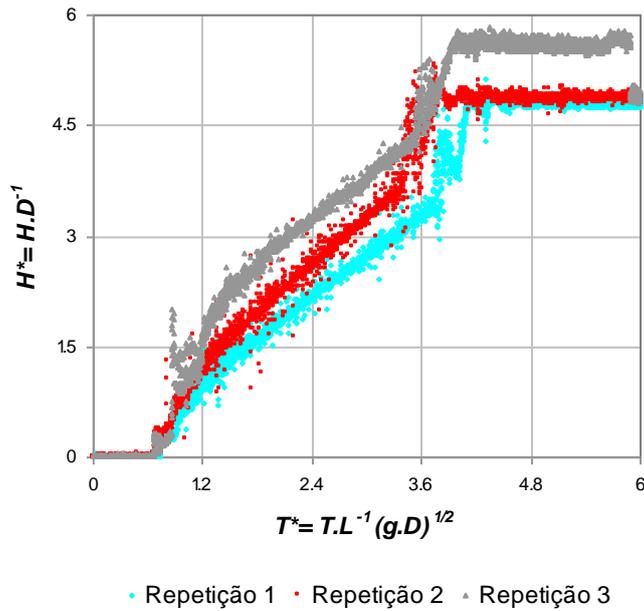


Figura 6.17: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$.

A coluna de água usou $2,52 L.(gD)^{-1/2}$ ou $36,07 s$ ($T^* \approx 3,57$; $T \approx 52,52 s$) para chegar a torre de ventilação (Figura 6.16), cerca de $9,1 s$ a mais, em média, quando comparado aos ensaios anteriores. O volume estimado de ar removido foi de $38,66 \cdot 10^{-3} m^3/s$. Observou-se a maior variação de pressão chegando a ordem $H^* = 4,97 \pm 0,5$. A velocidade chegou ao valor máximo de $V = 0,27(gD)^{1/2} m/s$ aos $T^* = 3,91$ ($55,96 s$), cinco vezes maior que a velocidade inicial de $0,05 (gD)^{1/2} m/s$ (Figura 6.18). Ressalta-se que para efeitos de análise,

os dados afetados pela presença de bolsões estacionados nos transdutores, alteração percebida nos gráficos anteriores, foram desprezados.

Aos $T^*=4,21$ (60,20 s) ocorreu o extravasamento, 9,2 s após a remoção do ar, apenas 2,3 s mais tarde quando comparado ao primeiro ensaio dessa seção e 1,3 s mais tarde, comparado ao ensaio anterior. O escoamento estabilizou-se sob a carga de $4,83 D$ com velocidade média de $V=0,21(gD)^{1/2}$, quase 4,0 vezes o valor da velocidade média inicial, correspondente a vazão de 1,45 L/s), 3,0 % maior que a vazão inicial, valor esse dentro da faixa de erro.

Notou-se a presença de bolsões discretos estacionados ao longo do conduto, com diâmetro médio de 0,05 m. Em um dos ensaios o bolsão ficou estacionado no transdutor de montante por $T^*=0,76$ ($T \approx 10,88$ s), causando um acréscimo de pressão de $0,8 D$ (Figura 6.16).

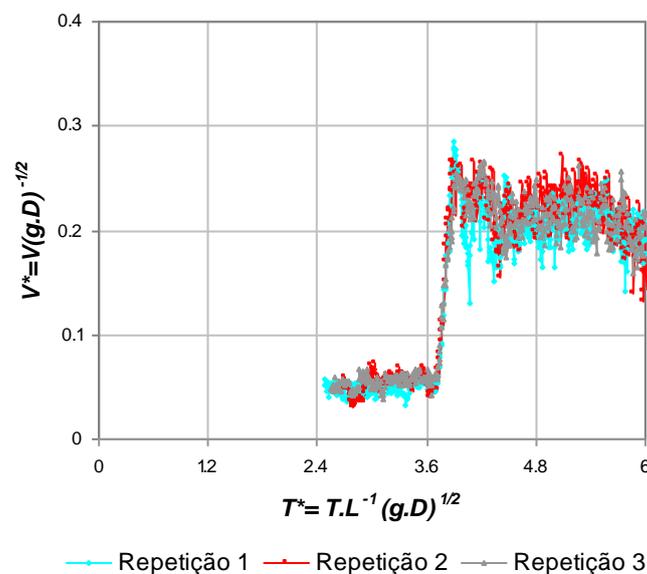


Figura 6.18: Medições do ADV- $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,09$.

Nos ensaios de vazão intermediária, notou-se que a pressurização na parte inferior do conduto iniciava-se mais cedo quanto menor fosse o diâmetro da peça instalada na torre de ventilação.

Para expulsão do ar a frente retrógrada compreendia cerca de 72% da vazão de entrada, uma média de $1,01 \cdot 10^{-3}$ m³/s. A interação ar e água, até a chegada à torre foi de maior duração para o ensaio com o menor diâmetro, uma diferença de 10,0 segundos em

comparação ao ensaio com o maior diâmetro, e 8,3 s com o diâmetro intermediário. Isso se deve à presença do bolsão de ar pressurizado fornecendo resistência à coluna retrógrada. Os picos de pressão ocorrem após a expulsão do ar devido ao colapso das duas colunas de água. O efeito de amortecimento propiciado pelo ar é notado no ensaio de diâmetro intermediário, apresentando uma redução maior que 6%. Já no ensaio de menor diâmetro, o bolsão estava sob carga 6,4 vezes maior e a energia necessária para sua remoção também teve que ser acrescida. Dessa forma, o pico de pressão foi de 22% a mais quando comparado ao ensaio de ventilação sem pressurização do ar. Embora apresente alterações significativas, essa interface vem sendo apenas citada, mas não se configura uma análise relevante, visto que a magnitude do pico está associada à configuração da torre de ventilação.

O enchimento da adutora ocorreu mais cedo para o diâmetro maior, cerca de 3,0 s antes quando comparado ao ensaio de menor diâmetro e apenas 1,0 s comparado ao ensaio de diâmetro intermediário. A vazão do estado permanente sofreu um acréscimo médio de 3% quando comparado à vazão inicial de entrada, porém esse valor encontra-se dentro do intervalo do erro estimado.

6.1.7 Ensaio experimental com $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$:

O escoamento iniciou-se em regime livre com vazão de entrada $0,79 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Encontrando a inclinação adversa formou-se o ressalto hidráulico que se movia para montante.

A pressurização na parte mais baixa do conduto foi notada por volta de $T^* \approx 3,10$ (44,36 s) (Figura 6.20). Nesse momento 71% da vazão fornecida à adutora retornavam para montante. Essa interface retrocedeu para expulsão do ar e preenchimento do conduto e não provocou pressurização significativa no bolsão de ar. O volume removido foi estimado em $25,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

A coluna de água leva $2,84 L \cdot (gD)^{-1/2}$ ou 40,5 s ($T^* \approx 5,94$; $T \approx 85,0$ s), para chegar a torre de ventilação (Figura 6.19). Observaram-se, nesse momento, sucessivas variações de pressão resultantes do colapso entre as colunas de água a primeira da ordem de $2,7 D$ em

$0,08 L.(gD)^{-1/2}$, ou 1,1 segundos. A segunda está relacionada à oscilação inercial e ocorreu após 5,6 s ($T^* \approx 6,32$; $T \approx 90,45$ s) da ordem de $H^* = 3,0 \pm 0,3$ em aproximadamente 1,4 s.

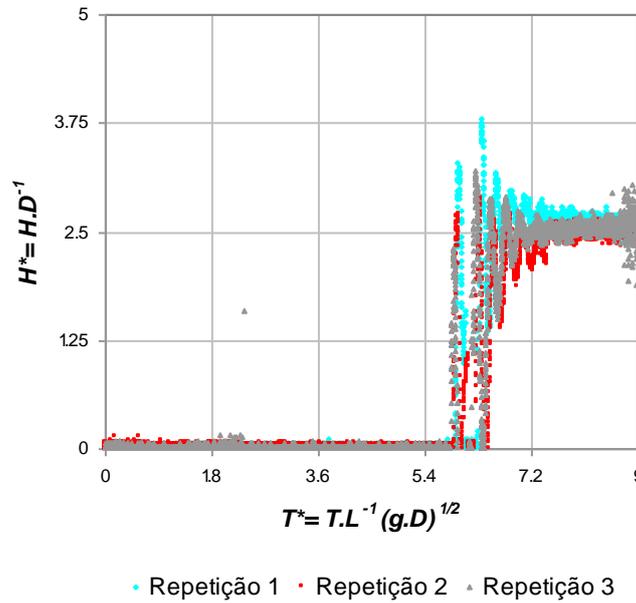


Figura 6.19: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$.

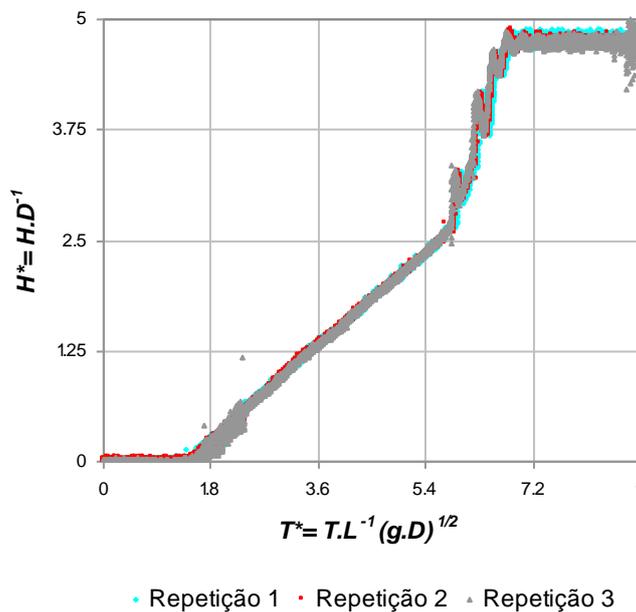


Figura 6.20: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$.

A velocidade chegou ao valor máximo de $V = 0,20 (gD)^{1/2}$ m/s, aos $T^* = 6,19$ (88,59 s) oito vezes maior que a velocidade inicial de $0,02 (gD)^{1/2}$ m/s (Figura 6.21). Dois picos sucederam a variação máxima de velocidade, relacionados também com a oscilação

inercial da massa de água, são eles: Aos $T^* = 6,56$ (94,10 s) com $V=0,17 (gD)^{1/2}$ m/s e aos $T^*=6,80$ (97,32 s) com $V=0,17 (gD)^{1/2}$ m/s.

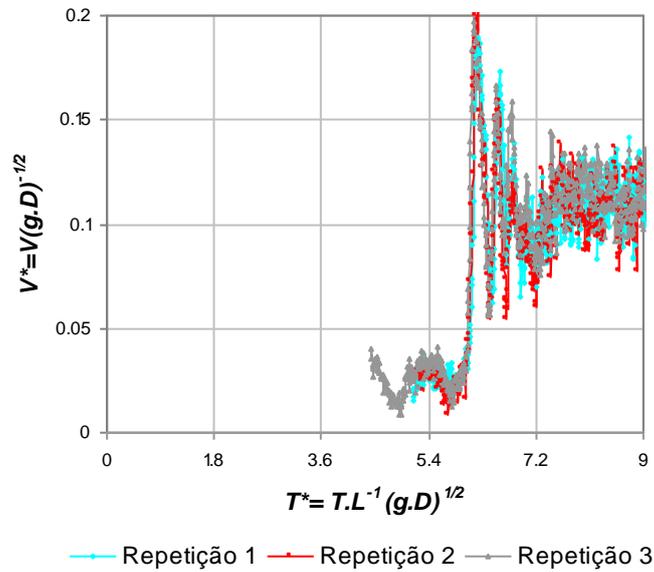


Figura 6.21: Medições do ADV- $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$.

O extravasamento ocorreu após 15,17 s ($T^*= 6,99$) depois da remoção do ar e a velocidade estabilizou-se próximo a $V=0,11 (gD)^{-1/2}$ m/s – cerca de 4,6 vezes maior que a velocidade média inicial. O escoamento estabiliza-se em regime permanente sob a carga de $H^*=4,74\pm 0,04$ (Figura 6.20) e com vazão de $0,76 \cdot 10^{-3}$ m³/s. Foi observada a presença de bolsões discretos estacionados ao longo do conduto, com diâmetro entre 0,01m a 0,05m.

6.1.8 Ensaio experimental com $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$:

Com vazão de entrada $0,77 \cdot 10^{-3}$ m³/s, o escoamento ocorreu em regime livre. Ao encontrar a inclinação adversa, houve a formação do ressalto hidráulico que se movia para montante.

Aos 44,08 s ($T^* \approx 3,08$) (Figura 6.23) o regime passa a ser pressurizado na parte mais baixa da tubulação. A vazão fornecida à adutora é em parte utilizada para o avanço da frente horizontal de enchimento, e em parte retorna para montante, cerca de 73%.

A interface retrógrada gasta $2,98 L.(gD)^{-1/2}$ ou 40,93 s ($T^*\approx 6,06$; $T \approx 86,7$ s), para chegar a torre de ventilação (Figura 6.22), praticamente 2,0 s a mais que o do ensaio anterior.

Chegando à torre, observaram-se sucessivas variações de pressão: a primeira devido ao colapso das colunas de água da ordem de $2,1D$ em $0,07 L.(gD)^{-1/2}$, ou 1,04 segundos ($T^* \approx 6,06$); a segunda, devido a oscilação inercial, após 5,15s ($T^* \approx 6,42$; $T \approx 91,88$) da ordem de $H^* = 2,54 \pm 0,03$. A pressurização do ar foi muito pequena, uma média de $H^* = 0,1 \pm 0,02$, mas repercutiu na redução de 22% no pico de pressão, comparado ao ensaio anterior.

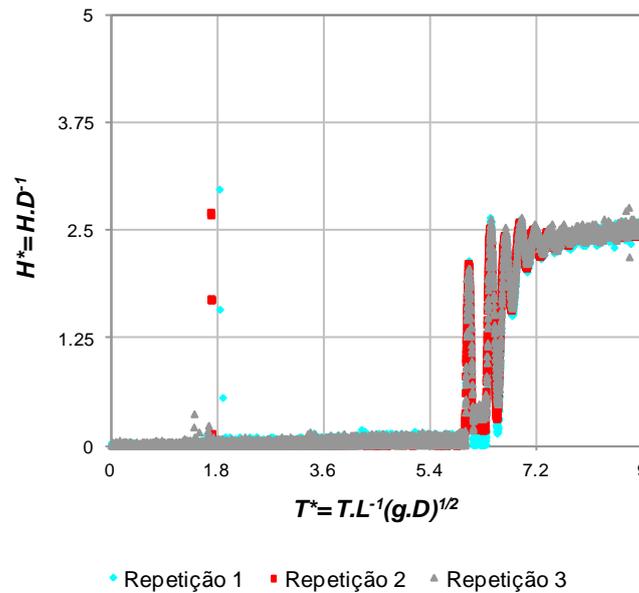


Figura 6.22: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$.

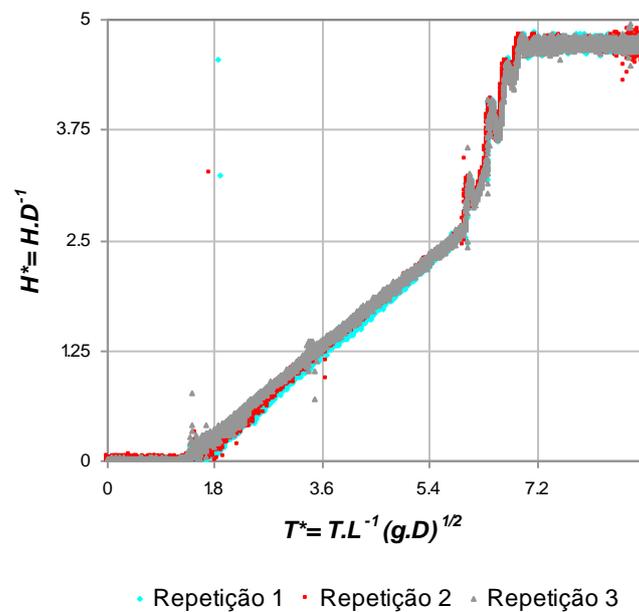


Figura 6.23: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$.

A velocidade chegou ao valor máximo de $V = 0,18 (gD)^{1/2}$ aos $T=6,38$ (91,31 s), 9,50 vezes maior que a velocidade inicial de $V = 0,02 (gD)^{1/2}$, seguido de dois picos (Figura 6.24).

Aos $T^*=6,75$ com $V=0,15 (gD)^{1/2}$ e aos $T^*=7,0$ com $V=0,13 (gD)^{1/2}$. A partir de então a velocidade tende a se estabilizar próximo a $V=0,10 (gD)^{1/2}$, 5,3 vezes maior que a velocidade média inicial, correspondente a vazão de $0,68 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. redução de 12% da vazão inicial. Apesar de ser uma redução um pouco acima da faixa de erro, tal diferença pode ser justificada, visto que está associada ao aumento do perímetro molhado da seção de escoamento e da atuação do atrito.

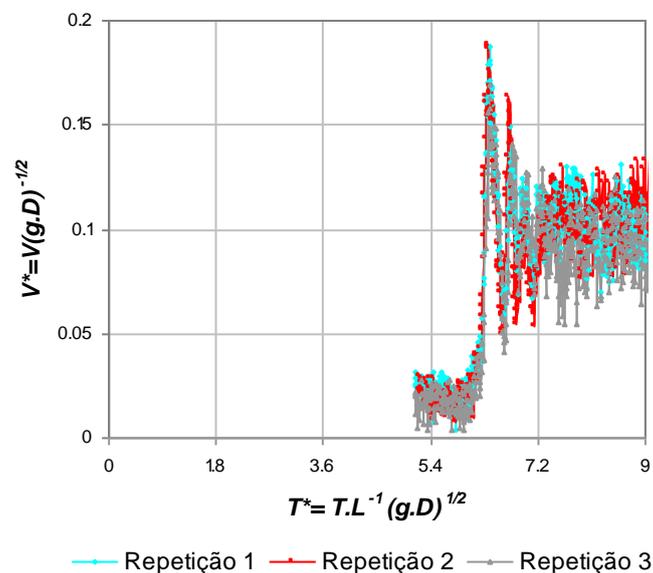


Figura 6.24: Medições do ADV- $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$.

O extravasamento ocorreu aos 106,67 s ($T^*=7,45$), 6,6 segundos a mais em relação ao ensaio anterior e quase 15,0 s depois da eliminação do ar. O escoamento estabilizou-se em regime permanente sob a carga de $H^* = 4,72 \pm 0,01$ (Figura 6.23). Notou-se a presença de bolhas discretas estacionadas próximas à torre de ventilação, com diâmetro entre 0,02 m a 0,05m.

6.1.9 Ensaio experimental com $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$:

No primeiro momento, o escoamento com vazão de $0,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ocorreu em regime livre, formando um ressalto hidráulico ao encontrar a inclinação adversa. Por volta de $T^* \approx 2,95$ (42,22 s) observou-se pressurização na parte mais baixa da tubulação (Figura 6.26), 1,9 s mais cedo comparado ao ensaio anterior, e 2,2 s mais cedo comparado ao ensaio com maior diâmetro. Nesse momento, 76% da vazão fornecida à adutora retrocedeu para expulsão do ar e preenchimento do conduto a montante. O restante seguiu na frente horizontal de enchimento. Notou-se, a partir de $T^*=0,38$, uma discreta pressurização do ar com carga média de $H^*=0,38 \pm 0,02$.

A coluna de água levou cerca de $3,60 L \cdot (gD)^{-1/2}$ ou 51,52 s ($T^* \approx 6,55$; $T \approx 93,74$ s), para chegar a torre de ventilação (Figura 6.25). A interação da interface ar água nesse ensaio foi de 10,8 s a mais comparada à média dos ensaios anteriores. Nisso pôde-se observar a interferência associada à leve pressurização do ar, que por sua vez provocou uma resistência maior ao escoamento. Posterior à eliminação do ar, observou-se sucessivas variações de pressão: a primeira, posterior ao colapso, da ordem de $H^*=2,82 \pm 0,04$ ($T^*=6,55$); A segunda após 8,6 s ($T^* \approx 7,15$; $T \approx 102,3$ s) da ordem de $2,81 D$ em 1,4 segundos, e; A terceira com pico de $3,06 D$ aos $T^*= 3,10$, sendo as duas últimas foram resultantes da oscilação inercial. Os dados da repetição 2, após a expulsão do ar foram desprezados devido às falhas no registro da pressão.

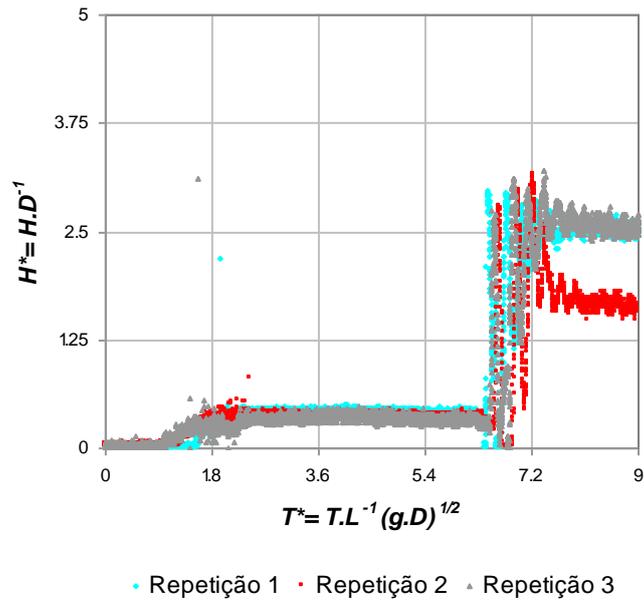


Figura 6.25: Medições do transdutor 01 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$.

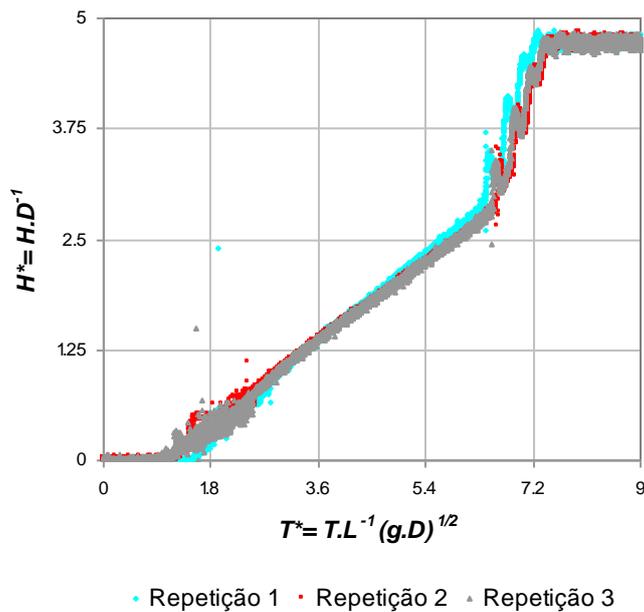


Figura 6.26: Medições do transdutor 02 - $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$.

A velocidade chegou ao valor máximo de $V = 0,16 (gD)^{1/2}$ aos $T^* = 6,90$ (99,0 s), 5,52 vezes maior que a velocidade inicial de $0,03(gD)^{1/2}$, seguido de três picos (Figura 6.27): Aos $T^* = 6,90$ com $V = 0,16(gD)^{1/2}$, aos $T^* = 7,21$ com $V = 0,13(gD)^{1/2}$ e aos $T^* = 7,43$ com $V = 0,01(gD)^{1/2}$. A velocidade que o escoamento tende-se a estabilizar é de $0,09(gD)^{1/2}$.

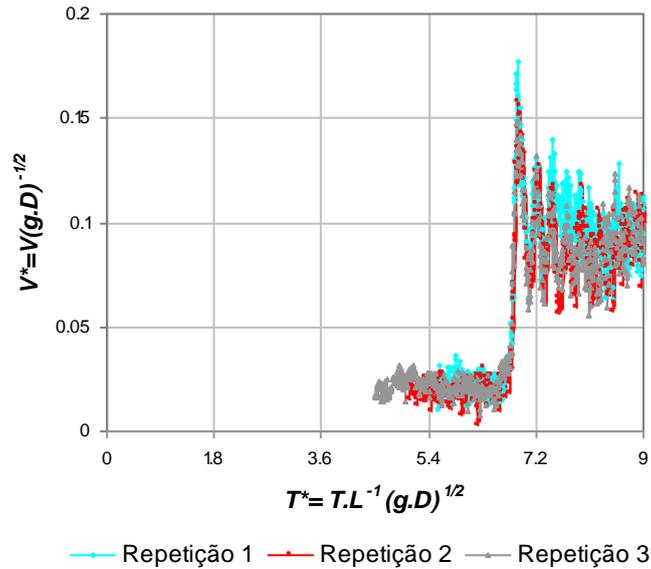


Figura 6.27: Medições do ADV- $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,09$.

O extravasamento ocorreu aos $T^*=7,92$ (113,51 s), 6,7 s a mais que o ensaio anterior e 13,3 s a mais, comparado ao primeiro ensaio. O escoamento estabilizou-se em regime permanente (Figura 6.26) sob carga de $H^*=4,72\pm 0,01$ e vazão de $0,64,10^{-3}$ m³/s, uma redução de 17% comparada a vazão inicial. Essa redução está associada a interferência do aumento da força de atrito inerente ao aumento da seção de escoamento. Foram verificadas presença de bolhas estacionadas com diâmetro médio de 0,025 m.

Para os ensaios de mínima vazão, notou-se que quanto menor o diâmetro da peça instalada na torre de ventilação, mais cedo se iniciava a pressurização na parte inferior do conduto, e mais susceptível ele estava à ocorrência da pressurização do ar. Observou-se que a frente retrógrada responsável pela expulsão do ar compreendia cerca de 74% da vazão de entrada, uma média de $0,78.10^{-3}$ m³/s. A interação ar e água, até a chegada de todo o ressalto à torre foi de maior duração para o ensaio com o menor diâmetro, uma diferença de 11,0 segundos em comparação ao ensaio com o maior diâmetro, e 10,6 s com o diâmetro intermediário. Tal diferença pode ser explicada devido à presença do bolsão de ar pressurizado fornecendo resistência à coluna retrógrada. O efeito de amortecimento propiciado pelo ar é notado no ensaio de diâmetro intermediário com uma redução de 22% no pico de pressão, comparado ao ensaio no qual a ventilação é máxima. Já no ensaio de menor diâmetro, o bolsão estava sob carga de 3 vezes maior e a energia necessária para sua remoção também teve que ser acrescida, resultando em um pico de pressão 34% maior comparado ao pico

produzido no ensaio do diâmetro intermediário e 4 % em relação ao ensaio com diâmetro máximo. O enchimento da adutora acontece mais cedo para o ensaio com diâmetro maior do orifício de ventilação, cerca de 13,0 s antes quando comparado ao ensaio de menor diâmetro e apenas 6,6 s comparado ao ensaio de diâmetro intermediário. A vazão, quando o escoamento estabilizou-se no estado permanente, sofreu uma redução maior que 10% em relação à vazão inicial, um resultado esperado tendo em vista que esse fator deve-se ao aumento na área da seção de escoamento e os respectivos efeitos do atrito entre a água e a parede da tubulação.

6.1.10 Ensaios experimentais, observações gerais:

A vazão de entrada era acompanhada pelo medidor tipo roda d'água e a vazão da frente de enchimento foi determinada com dados fornecidos pelo transdutor de jusante. Com efeito, a vazão retrógrada foi determinada pela diferença entre as duas vazões anteriores e a vazão do estágio de escoamento permanente foi calculada a partir de dados do ADV. Observou-se que para alguns ensaios, no início do escoamento a vazão de entrada era maior, uma vez que após a eliminação do ar, o escoamento passava a ocorrer em seção plena, aumentando assim a influência do atrito e conseqüentemente o acréscimo da perda de carga. Dessa forma ocorria a redução da vazão.

Como já mencionado, notou-se, inicialmente, que o escoamento ocorria em regime supercrítico. Na mudança de declividade ocorria a formação do ressalto hidráulico e nessa interface distinguiam-se duas colunas de água, a coluna de enchimento trafegando para jusante e a coluna retrógrada, essas transportando vazões distintas. Quanto menor a vazão de entrada, maior a porcentagem dessa vazão fornecida retornava para expulsão do ar. Para vazão máxima, em média 70%, vazão intermediária, 72% e vazão mínima 74%.

Após a formação do ressalto hidráulico, observou-se que para os ensaios de vazão máxima e intermediária, o preenchimento de toda seção na parte mais baixa da adutora, denominado como selo hídrico, ocorre mais rapidamente. As oscilações na superfície da lâmina d'água permite a formação de bolsões, com dimensões suficientes para vencer a força de arraste e trafegar para montante, encontrando o ressalto hidráulico – *slug flow* e *blowback*. Nos ensaios de vazão mínima, como o preenchimento ocorre de forma mais

gradual, não se detectou a formação do *slug flow*. Mas é importante ressaltar, como esquematizado em sequência na Figura 6.28, que o ressalto incorpora o ar de montante formando pequenas bolhas, devido a essa dimensão, as bolhas trafegam para jusante, mas não conseguem ultrapassar o ponto de mudança de declividade (a). Enquanto isso, essas bolhas seguem-se aderindo até chegarem a uma dimensão que vença a força de arraste. Dessa maneira, ou ficam estacionadas (b) ou continuam se agregando (c) possibilitando a formação do *slugflow*, que por sua vez trafega até reencontrar o ressalto hidráulico (d).

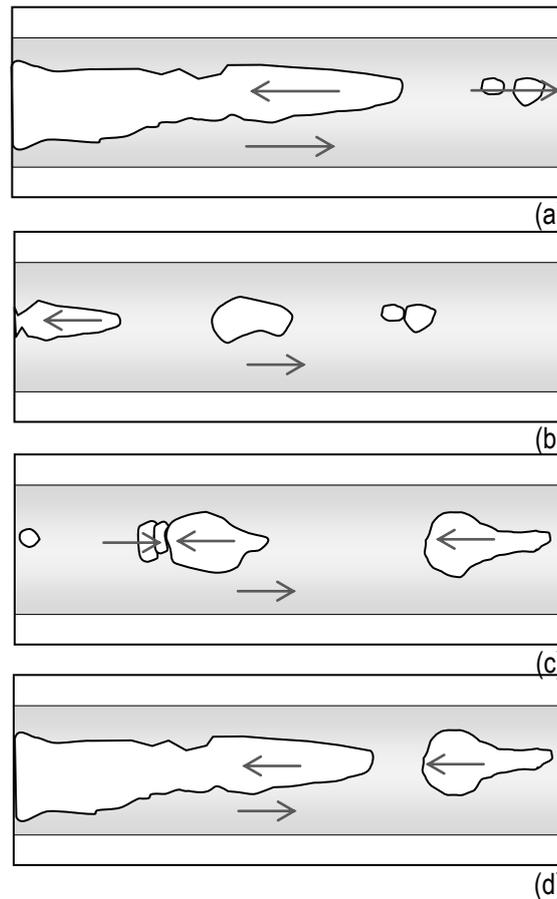


Figura 6.28: Representação esquemática vista da parte superior do conduto de um ressalto hidráulico e do *slug flow*. (a)ressalto e bolhas trafegando para jusante; (b) bolhas estacionadas; (c) aderência de bolhas e *slug flow* trafegando para montante; (d) *slug flow* encontrando o ressalto hidráulico.

Tais bolhas alongadas assumem diversas configurações físicas e na Figura 6.29 são ilustradas algumas das formas detectadas nos ensaios experimentais.

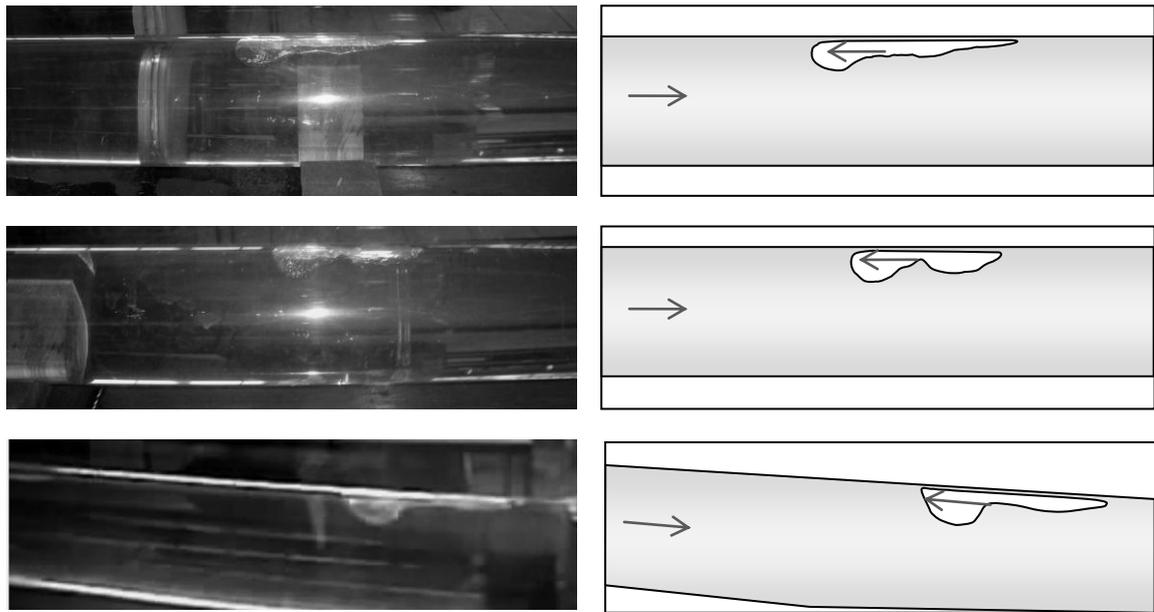


Figura 6.29: Fotografias e representação gráfica do *slug flow*.

A quantidade de ar admitida pelo ressalto não ultrapassava o selo hídrico formado no ponto mais baixo da adutora e retornava no formato de *slug flow* para o bolsão maior, logo a frente do ressalto. Após a expulsão do ar, os bolsões que ficavam estacionados tinham o diâmetro médio de 0,0254 m. O volume desse ar acumulado não ultrapassava 0,5% do total removido.

Quanto ao processo de eliminação do ar pela torre de ventilação, denotou-se que as velocidades de escape não assumiam valores tão altos e a variação de pressão da mínima para máxima em que o bolsão de ar era submetido era pequena. Desta forma, a variação de densidade do ar no referido intervalo de tempo também era pequena podendo assim assumir a incompressibilidade deste. Nas condições de laboratório, adotando a temperatura do ar igual à temperatura ambiente de 25°C, o número de Mach não passava de 0,1, associado assim a condições subsônicas. Pode se citar como exemplo, o ensaio de máxima vazão e mínimo diâmetro de ventilação, no qual a velocidade média do ar chegou ao valor de 27 m/s. Portanto, o regime de escoamento de ar no orifício, para todos os ensaios, operava sem estrangulamento. Nesse contexto, adotando que o escoamento do ar é incompressível e que a quantidade de ar admitida pelo ressalto é pequena, assumiu-se a hipótese de que a vazão de escape do ar pelo orifício é a mesma da frente retrógrada. Os valores são apresentados na Tabela 6.1, podendo ser visualizados também na Figura 6.30.

Tabela 6.1: Vazão do ar pelo orifício da torre de ventilação.

Q^*	D_o^*	Q_{ar}	Q_{ar}^*
0,3	0,27	0,00145	0,190
	0,18	0,00155	0,200
	0,09	0,00141	0,185
0,2	0,27	0,00103	0,135
	0,18	0,00098	0,129
	0,09	0,00103	0,135
0,1	0,27	0,00056	0,073
	0,18	0,00057	0,074
	0,09	0,00059	0,077

Q_{ar} vazão do ar em m³/s; Q_{ar}^* vazão do ar, adimensional. $\Delta\bar{x} = \pm 0,00009$

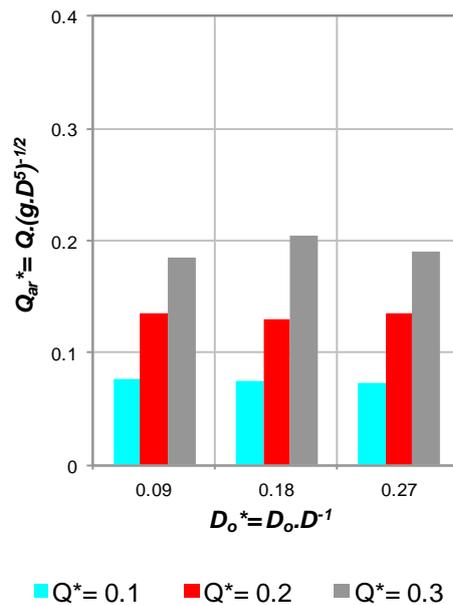
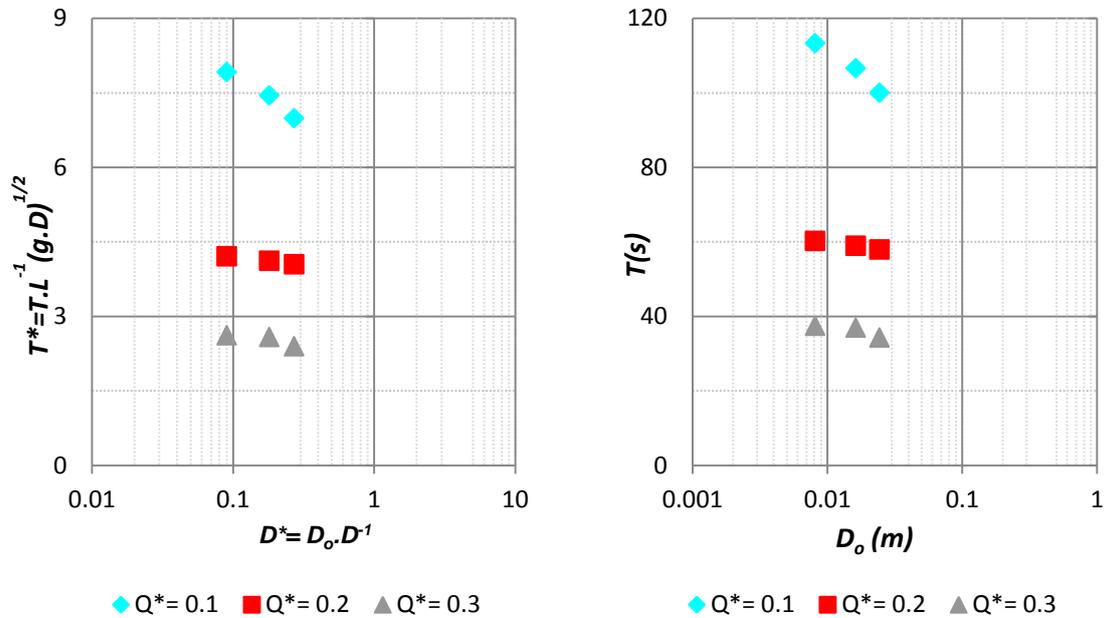


Figura 6.30: Gráfico D_o^* versus Q_{ar}^*

Quanto maior o orifício instalado para ventilação, mais rapidamente ocorre o enchimento da adutora (Figura 6.31). Observou-se que para os ensaios de máxima vazão, o enchimento da adutora era completado 3 s mais cedo quando utilizado o diâmetro maior par ventilação. Nos ensaios de vazão intermediária, notou-se que o tempo para enchimento era acrescido em cerca de 1s quanto menor fosse o orifício para ventilação. Já para os ensaios de vazão

mínima, o acréscimo no tempo era cerca de 6,5 s. Em outras palavras, o acréscimo de tempo, devido ao uso do diâmetro menor para ventilação chegou ao máximo de 9%, 4% e 13% para as vazões máxima, intermediária e mínima respectivamente. Tais diferenças apresentam como a presença do bolsão de ar e sua pressurização tende a retardar o enchimento.

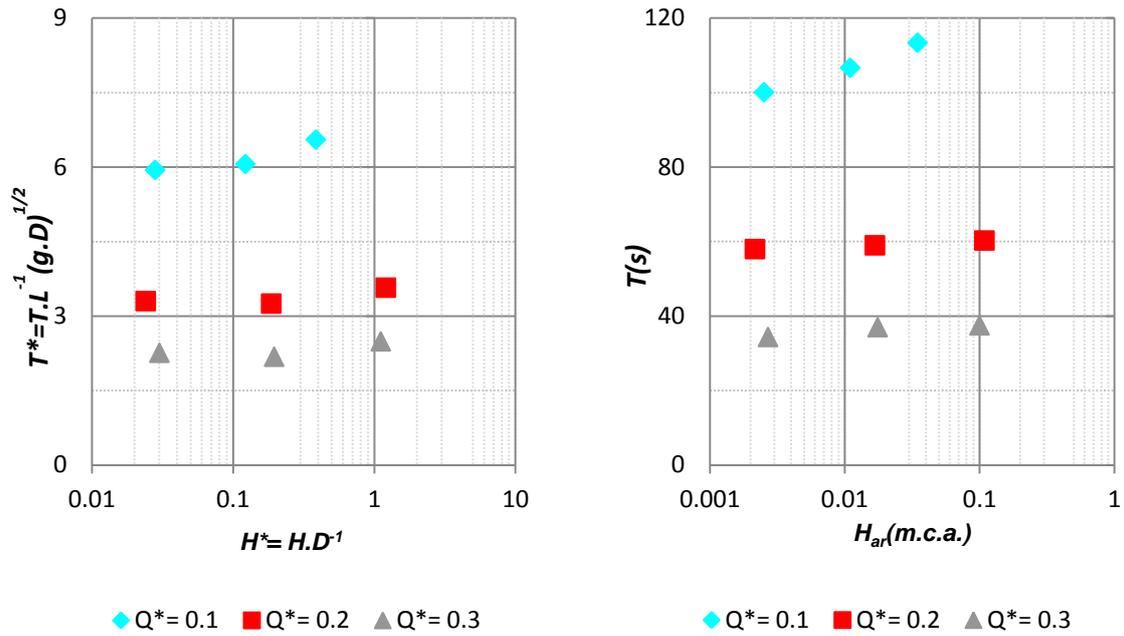


(a)

(b)

Figura 6.31: Diâmetro do orifício *versus* tempo para enchimento – (a)Adimensional e (b)Dimensional.

Como é sabido, a ventilação influencia no tempo necessário para o escape do ar. Quando a área do orifício é reduzida, o ar passa a ser pressurizado. Na Figura 6.32 pode-se observar a pressurização média e o tempo gasto para eliminação do ar. Quando a pressurização é da ordem de $1D$, o tempo necessário para eliminação do ar é cerca de 10,0% maior comparado ao caso de ventilação ideal.



(a) (b)
 Figura 6.32: Pressurização média do ar *versus* tempo para eliminação do ar na linha –
 (a) Adimensional e (b) Dimensional.

6.2 COMPARAÇÃO COM MODELOS NUMÉRICOS

As simulações com diâmetro máximo do orifício instalado na torre de ventilação foram realizadas através do modelo AduTrans. Para esta pesquisa, adotaram-se os dados experimentais para a interface do programa, respeitando comprimentos e declividades. O parâmetro de entrada específico para cada um dos três cenários trabalhados foi o grau de abertura da válvula de 60%, 36% e 23% respectivos à vazão máxima, intermediária e mínima.

Para as simulações com diâmetros médio e mínimo, utilizou-se o modelo de Leite (2009). Os parâmetros específicos que determinam a vazão máxima, intermediária e mínima são as perdas de cargas no sistema no total de 3,55 m.c.a, 4,25 m.c.a. e 5,80 m.c.a..

6.2.1 Eventos relevantes no processo de enchimento:

Foram avaliados os efeitos mais significativos de cada ensaio, como o tempo gasto para o início da pressurização, para eliminação do ar, para ocorrência do extravasamento e a carga de pressão quando o escoamento atinge o estado permanente.

a) Pressurização:

A pressurização citada é referente ao momento em que a carga de pressão é maior que $1 D$ no ponto mais baixo da adutora. Os resultados são apresentados na Figura 6.33.

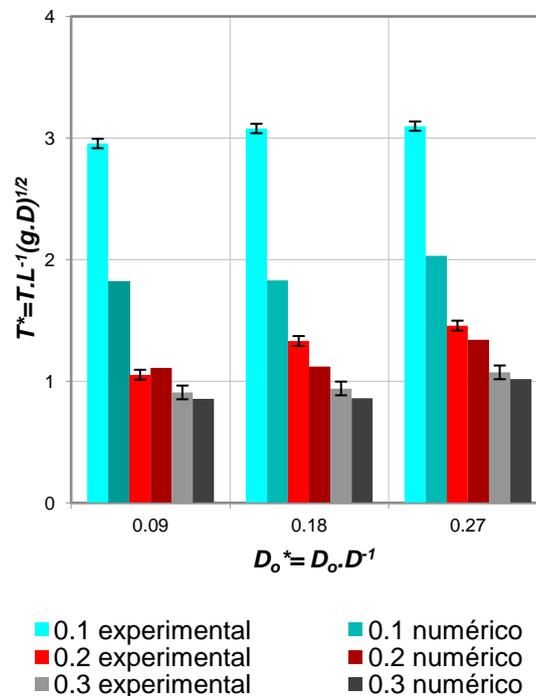


Figura 6.33: Predição numérica e dados experimentais referente à pressurização para as vazões $Q^* = 0,30; 0,20$ e $0,10$.

Considerando os ensaios de vazões máxima, intermediária e mínima, cada um com as três variações de diâmetro do orifício para ventilação, calculou-se o erro padrão. É apresentado em sequência o maior valor de erro encontrado para cada série experimental: - $Q^* = 0,1$ foi de $\Delta \bar{x}_1 = \pm 0,04$; - $Q^* = 0,2$ de $\Delta \bar{x}_2 = \pm 0,04$, e; - $Q^* = 0,3$ de $\Delta \bar{x}_3 = \pm 0,06$.

Quanto à pressurização, nas simulações com vazão máxima os ensaios com os dois diâmetros menores começavam no mesmo instante de tempo ($T^* = 0,86$), uma antecipação

de 0,9 s em média quando comparado aos dados experimentais. Para o diâmetro maior a antecipação era de 0,7 s ($T^*=1,02$).

Na simulação com vazão intermediária, numericamente, os ensaios com os dois diâmetros menores iniciavam-se praticamente ao mesmo tempo $T^*=1,11$. Comparado ao dado experimental do diâmetro intermediário a predição é de 3,0 s mais cedo, enquanto que para o diâmetro mínimo a diferença é de 0,8 s mais tarde. Para o diâmetro maior a antecipação era de 1,72 s ($T^*=1,34$) em relação aos dados de ensaio.

Segundo os resultados da simulação para vazão mínima, os ensaios com os dois diâmetros menores iniciavam-se praticamente ao mesmo tempo $T^*=1,82$ em média. Comparado aos dados experimentais, observa-se uma significativa diferença de tempo, pois a predição antecipa tal pressurização em cerca de 17,0 s, em média. Para o diâmetro máximo a antecipação foi de 15,3 s ($T^*=2,03$).

Observa-se que as predições numéricas mais próximas aos dados experimentais referem-se aos ensaios de vazões máxima e média.

b) Eliminação do ar:

Como no modelo AduTrans, não foi simulado a presença do orifício com os diâmetros variados, devido limitações do próprio modelo restritas aos escoamentos com ventilação ideal, considerou-se como eliminação do ar o momento em que o ressalto hidráulico chegava ao ponto a 0,365 m após a válvula, relativo a posição do transdutor 1. Já no modelo de Leite (2009), a interface gráfica mostrava o instante de eliminação do ar. Os resultados são apresentados na Figura 6.34.

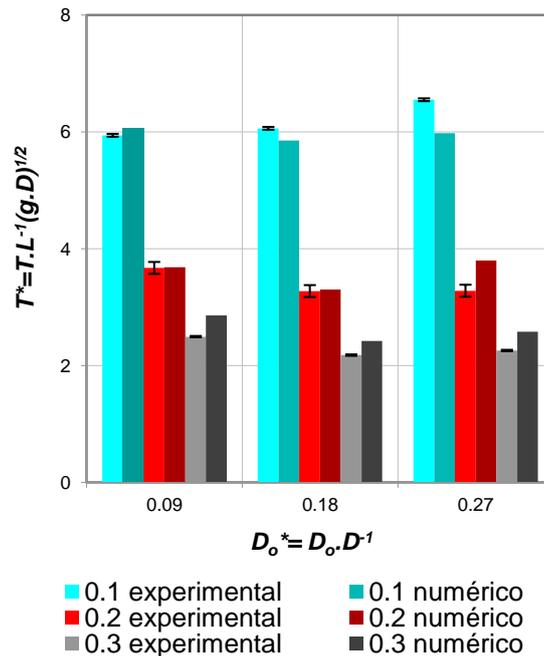


Figura 6.34: Predição numérica e dados experimentais referente à eliminação do ar para as vazões $Q^* = 0,10; 0,20$ e $0,30$.

Considerando os ensaios, para diferentes diâmetros de ventilação, com vazão máxima, intermediária e mínima, determinou-se o erro padrão de cada um. É apresentado em sequência apenas o maior valor de erro encontrado para cada série experimental: - $Q^* = 0,1$ foi de $\Delta\bar{x}_1 = \pm 0,02$; - $Q^* = 0,2$ de $\Delta\bar{x}_2 = \pm 0,10$, e; - $Q^* = 0,3$ de $\Delta\bar{x}_3 = \pm 0,03$.

Segundo os resultados experimentais com vazão máxima, a eliminação do ar ocorre mais rapidamente para o ensaio com diâmetro intermediário ($T^* = 2,18$), cerca de 1,0 segundo antes, comparado ao ensaio com ventilação máxima, e 4,4 segundos antes comparado ao ensaio com ventilação mínima. A simulação numérica também apresentou que a eliminação do ar ocorre mais cedo para o ensaio de diâmetro intermediário ($T^* = 2,42$), porém 3,4 segundos mais tarde que o respectivo ensaio experimental. Os resultados com diâmetro máximo e mínimo também apresentaram que a eliminação do ar ocorria em média aproximadamente 5,0 segundos mais tarde. A eliminação ocorreu aos $T^* = 2,58$ e $T^* = 2,86$ respectivamente (Figura 6.34). Com efeito, o tempo decorrido entre a pressurização na parte mais baixa e a eliminação do ar, a denominada interação entre ar e água, foi de $2,58 L.(gD)^{-1/2}$, $2,42 L.(gD)^{-1/2}$ e $2,86 L.(gD)^{-1/2}$ segundos, considerando a

sequência do máximo ao mínimo diâmetro. Comparado aos valores experimentais, a interação calculada tem um intervalo de 5,3 s a mais.

Considerando a vazão intermediária, experimentalmente, a eliminação do ar é mais tardia para o ensaio com ventilação mínima ($T^* = 3,57$) e ocorre de forma mais rápida e praticamente ao mesmo tempo para os ensaios com diâmetro intermediário e máximo ($T^* = 3,28$). A simulação numérica também apresentou que a eliminação do ar ocorre mais cedo para o ensaio de diâmetro intermediário ($T^* = 3,30$) e para o diâmetro mínimo ($T^* = 3,68$), uma diferença desprezível de tempo quando comparada aos respectivos valores experimentais. Porém os resultados com diâmetro máximo, pela simulação, é a eliminação que mais demoraria ($T^* = 3,80$), cerca de 7,4 s mais tarde em relação ao valor experimental. Com efeito, o tempo de interação entre ar e água foi de $2,46 L.(gD)^{-1/2}$, $2,18 L.(gD)^{-1/2}$ e $2,57 L.(gD)^{-1/2}$ segundos, considerando a sequência do máximo ao mínimo diâmetro. Em relação aos valores experimentais, a interação calculada tem um intervalo de 9,0 s a mais, no caso da ventilação máxima, 3,4 s a mais, na ventilação média e menos de 1s para ventilação mínima.

Para vazão mínima, as predições da eliminação do ar também foram antecipadas. Conforme os resultados numéricos visualizados na Figura 6.34, a eliminação do ar é mais tardia para o ensaio com ventilação mínima ($T^* = 6,06$) e ocorre de forma mais rápida para os ensaios com diâmetro intermediário e máximo ($T^* = 5,85$ e $T^* = 5,98$). Os dados experimentais apresentaram que a eliminação do ar ocorre mais cedo para o diâmetro máximo ($T^* = 5,94$) e mais tarde ($T^* = 6,55$) para diâmetro mínimo. Comparativamente, a predição da eliminação em relação aos ensaios experimentais é cerca de 2,0 s depois para os diâmetros máximo, 3,0 s antes para o intermediário e chega aos 8,0 s de antecipação para o ensaio com o diâmetro mínimo. Dessa forma, o tempo de interação entre ar e água, nas predições numéricas é, em média, 10,0 s a mais do que o tempo observado nos ensaios experimentais com os três tipos de ventilação. A saber, essa interação foi de $3,95 L.(gD)^{-1/2}$, $4,02 L.(gD)^{-1/2}$ e $4,24 L.(gD)^{-1/2}$ segundos, considerando a sequência do máximo ao mínimo diâmetro.

c) Enchimento da adutora:

Os ensaios experimentais mostraram que o extravasamento ocorre mais cedo, quanto maior o diâmetro do orifício instalado na torre de ventilação. Numericamente, tem-se a mesma

tendência, porém a previsão para o extravasamento leva um tempo maior, como pode ser observado na Figura 6.35.

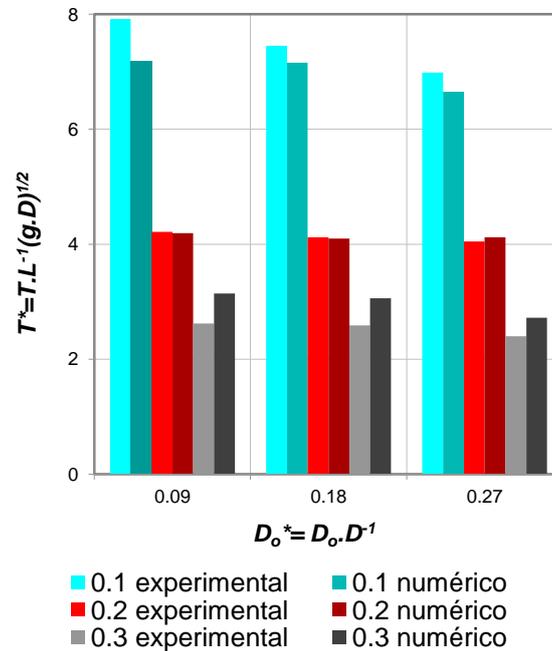


Figura 6.35: Predição numérica e dados experimentais referente ao extravasamento para as vazões $Q^* = 0,10; 0,20$ e $0,30$.

Para cada ensaio, o erro padrão foi calculado. O maior valor encontrado, considerando as três séries foi de $\Delta\bar{x} = \pm 0,02$. Devido a essa pequena magnitude relativa aos valores experimentais, não foi representado no gráfico acima.

Avaliando os resultados experimentais e numéricos dos ensaios de máxima vazão, observa-se que a simulação apresentava o extravasamento cerca de 4,58 , 6,87 e 7,44 segundos ($T^* = 2,72; T^* = 3,06; T^* = 3,17$) após em relação ao tempo aferido nos ensaios com D^* de 0,27, 0,18 e 0,09, respectivamente. Quanto ao tempo decorrido entre a eliminação do ar e o extravasamento, a predição desse intervalo pelo modelo AduTrans não apresentou diferença significativa comparada aos valores experimentais. Já os dados resultantes da simulação pelo modelo de Leite (2009) apresentaram 2,9 s a mais nesse processo.

Para os ensaios com vazão intermediária, foi observado que nos ensaios experimentais, o extravasamento ocorre mais cedo, quanto maior o diâmetro do orifício instalado na torre de ventilação. Numericamente, a previsão do extravasamento para ventilação máxima e média

é praticamente a mesma $T^*=4,12$ e $T^*=4,10$, para ventilação mínima $T^*=4,19$, um pequeno acréscimo. Referente aos resultados experimentais, a predição para ventilação média e mínima tem boa concordância. Para vazão máxima, a predição numérica retarda em apenas 1 s o extravasamento (Figura 6.35). Quanto ao tempo decorrido entre a eliminação do ar e o extravasamento, a predição desse intervalo pelo modelo AduTrans antecipou em 6,4 s. Já os dados resultantes da simulação pelo modelo de Leite (2009), apresentaram apenas 0,6 s de antecipação nesse processo.

Quanto ao extravasamento dos ensaios de vazão mínima, foi observado que nos experimentos, quanto maior o diâmetro instalado na torre de ventilação mais cedo ele ocorria. Numericamente, a previsão do extravasamento para ventilação média e mínima é praticamente a mesma $T^*=1,83$ e $T^*=1,82$ e para ventilação máxima $T^*=2,03$. Referente aos resultados experimentais, a predição numérica antecipa o extravasamento, em média, cerca de 16,4 s (Figura 6.35). Quanto ao tempo decorrido entre a eliminação do ar e o extravasamento, a predição desse intervalo pelo modelo AduTrans diminuiu essa interação em 5,3 s. Os dados resultantes da simulação pelo modelo de Leite (2009) aumentou esse intervalo em 4,0 s para ventilação intermediária e teve boa concordância para ventilação mínima.

d) Regime permanente:

Ocorrido o início do extravasamento, o escoamento tende-se a estabilizar em regime permanente. Na Figura 6.36 são apresentados os valores experimentais e os resultantes da simulação numérica.

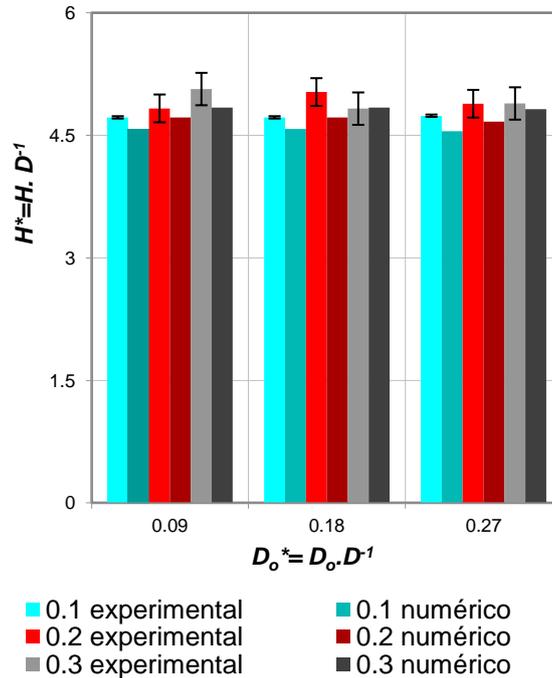


Figura 6.36: Predição numérica e dados experimentais referente ao regime permanente para as vazões $Q^* = 0,10$; $0,20$ e $0,30$.

Calculou-se o erro padrão para cada ensaio experimental. É apresentado, em sequência, apenas o maior valor de erro encontrado para cada série: - $Q^* = 0,1$ foi de $\Delta \bar{x}_1 = \pm 0,01$; - $Q^* = 0,2$ de $\Delta \bar{x}_2 = \pm 0,17$; e; - $Q^* = 0,3$ de $\Delta \bar{x}_3 = \pm 0,20$.

O escoamento, considerando os ensaios de vazão máxima nessa sequência $D^* = 0,09$, $0,18$ e $0,27$, estabilizou-se em regime permanente sob a carga de pressão de $H^* = 5,07$, $4,83$ e $4,89$ experimentalmente e $H^* = 4,84$, $4,84$ e $4,82$ pela resolução numérica. A diferença significativa é de 4% ocorrida no ensaio com $D^* = 0,09$.

O escoamento nos ensaios de vazão intermediária, segundo as simulações numéricas, estabilizou-se em regime permanente sob a carga de pressão de $H^* = 4,72$ para os ensaios com ventilação $D^* = 0,09$ e $0,18$ e $H^* = 4,67$ para a ventilação máxima de $D^* = 0,27$. A diferença significativa, concernente aos resultados experimentais foi de 4% menor ocorrida no ensaio com ventilação máxima e de 6% menor ocorrida no caso da ventilação intermediária.

Para os ensaios de mínima vazão, o escoamento estabilizou-se em regime permanente sob a carga de pressão de $H^* = 4,58$ para os ensaios com ventilação $D^* = 0,09, 0,18$ e $H^* = 4,55$ para a ventilação máxima de $D^* = 0,27$. A diferença significativa, concernente aos resultados experimentais é de 4% menor ocorrida no ensaio de ventilação máxima.

As pequenas discordâncias entre resultados experimentais e numéricos, para o parâmetro avaliado, podem estar associadas à presença de bolhas e bolsões que ficaram estacionados no conduto.

e) Vazão de água no regime permanente:

Observou-se a predição pelos modelos da vazão do enchimento no regime permanente e a vazão calculada a partir dos dados do ADV. A comparação é apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Vazão de água no regime permanente.

Q^*	D_o^*	$Q_{\text{experimental}}$	$Q_{\text{numérico}}$
0,3	0,27	0,0020	0,0019±0,0001
	0,18	0,0021	0,00216±0,00005
	0,09	0,0020	0,00216±0,00005
0,2	0,27	0,0014	0,0012±0,0001
	0,18	0,0015	0,00151±0,00005
	0,09	0,0014	0,00151±0,00005
0,1	0,27	0,0008	0,0008±0,0001
	0,18	0,0007	0,00087±0,00005
	0,09	0,0007	0,00087±0,00005

Q - vazão de água em m³/s. Erro de $Q_{\text{experimental}}$ $\Delta\bar{x} = \pm 0,0001$

Com esses dados observou-se que os valores resultantes do modelo proposto por Leite (2009), tem boa aproximação com os dados experimentais para os casos de vazão máxima e intermediária, ficando em cerca de 5% de diferença. Já com os ensaios de vazão mínima, a predição não foi satisfatória, superestimando a vazão final em cerca de 25%.

O modelo AduTrans também tem razoável predição, não chegou a 4% de diferença nos ensaios de máxima e mínima vazão, porém o ensaio com vazão intermediária teve o valor subestimado em 13%.

6.2.2 Comparação entre valores medidos e previstos de pressão do ar:

Sabe-se que no processo de eliminação do ar, ocorre sua pressurização, sua expulsão por parte da coluna de água que retorna para montante no formato de ressalto hidráulico. Esse colapso é responsável pelo pico de pressão detectado nos ensaios experimentais. Os picos de pressões que podem ser visualizados na seção 6.2.3 estão associados ao momento em que o ar foi eliminado e a coluna de água sobe pela torre de ventilação. Por ser uma medida associada à configuração da torre, e essa configuração, por sua vez, não é similar às instalações em adutoras, não foi objeto de estudo, embora tenha sido descrito nos resultados experimentais.

A pressão média do ar não é calculada pelo AduTrans, que em seu escopo já tem como premissa a ausência dessa pressurização. O modelo de Leite (2009), como já citado anteriormente, usa as formulações de Zhou *et al.*,(2002) para determinar a pressão do ar e em sua interface gráfica apresenta a evolução da pressão do ar no tempo. Portanto, na Figura 6.37 são apresentadas a pressurização média do ar por simulação numérica e pelo respectivo ensaio experimental, exceto os casos com diâmetro máximo, que foram simulados pelo modelo AduTrans.

No ensaio de vazão máxima e diâmetro intermediário, a predição numérica tem boa concordância com o valor experimental. Já com o de diâmetro mínimo, a pressurização do ar teve uma superestimação de 40%, como se pode observar na Figura 6.37.

Para o ensaio com vazão intermediária, os valores numéricos e experimentais não tem uma boa concordância, chegando a subestimar em 40% a pressurização, como no caso que utilizou o diâmetro mínimo. Nos ensaios de vazão mínima e de diâmetros intermediário e mínimo, não se teve uma boa concordância com os dados experimentais, chegando a subestimar em 77% a pressurização média observada no ensaio com ventilação intermediária e 6% no ensaio com ventilação mínima.

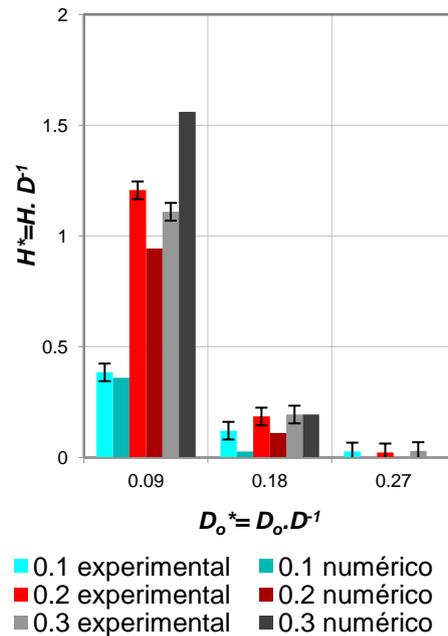


Figura 6.37: Predição numérica e dados experimentais referente a pressurização média do ar para as vazões $Q^* = 0,10, 0,20$ e $0,30$. Erro padrão de $\Delta\bar{x} = \pm 0,04$.

A vazão de ar pelo orifício de ventilação nos ensaios experimentais foi estimada considerando a hipótese já mencionada anteriormente que permite considerar que a vazão pelo qual o ar eliminado é igual a vazão da coluna retrógrada de água.

A estimativa de vazão de escape do ar pelo orifício não é calculada pelo modelo Adutrans, porém pôde ser estimada usando informações do arquivo que ele gera. Adotaram-se informações de um ponto médio do trecho descendente no intervalo em que o escoamento ocorre em regime livre, antes da formação do ressalto hidráulico, e o tempo que a frente retrógrada levou para chegar ao ponto associado à posição do transdutor de montante. O modelo de Leite (2009) em sua interface gráfica apresenta o volume do bolsão de ar e o tempo utilizado em sua eliminação, viabilizando o cálculo da vazão média. Os valores são apresentados na Tabela 6.3 e na Figura 6.48 e apresentam uma razoável concordância com os dados experimentais. Tais diferenças estão associadas às hipóteses consideradas no cálculo, tanto nos dados experimentais como nos modelos, ambas as previsões não são precisas e não houve a possibilidade de serem confirmadas com um dado experimental, já que a vazão do ar não foi medida.

Tabela 6.3: Vazão do ar pelo orifício da torre de ventilação.

Q^*	D_o^*	Q_{ar} estimada	Q_{ar} numérico
0,3	0,27	0,0014	0,00203
	0,18	0,0015	0,00157
	0,09	0,0014	0,00114
0,2	0,27	0,0010	0,00139
	0,18	0,0010	0,00115
	0,09	0,0010	0,00978
0,1	0,27	0,0006	0,00090
	0,18	0,0006	0,00067
	0,09	0,0006	0,00064

Q_{ar} - vazão do ar em m³/s. Erro de Q_{ar} $\Delta\bar{x} = \pm 0,0001$

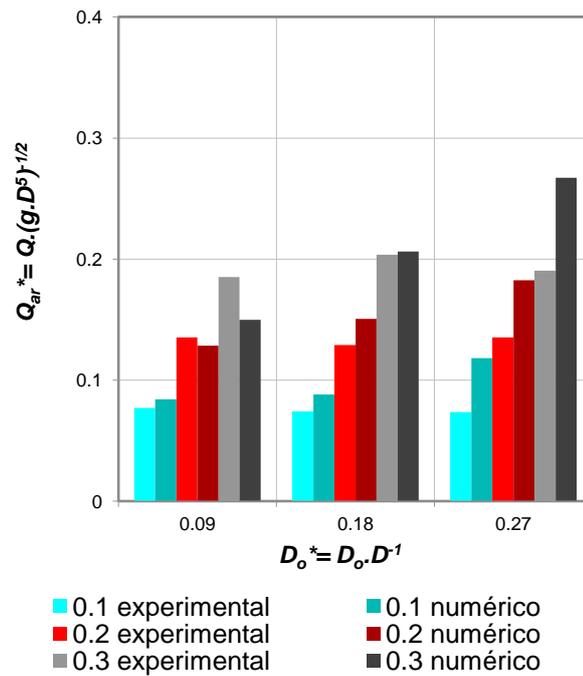


Figura 6.38: Predição numérica e valor calculado a partir de dados experimentais referente a vazão média do ar com vazões de $Q^* = 0,30, 0,20$ e $0,10$.

6.2.3 Comparação das hidrógrafas de pressão medidas e previstas:

As hidrógrafas de pressão resultantes do modelo AduTrans, utilizado apenas para os casos de ventilação máxima, são apresentadas nas Figuras 6.39, 6.40 e 6.41. Diante do exposto até então e do que pode ser observado nessas figuras, conclui-se que o modelo possui uma satisfatória concordância com os dados experimentais.

Quanto à predição de tempo dos principais eventos, para a vazão máxima, a divergência média é de 3,0 s. Para vazão intermediária, é cerca de 5,0 s, enquanto que para vazão mínima, assim como no modelo de Leite (2009), a divergência média é de quase 12,0 s. Concernente à previsão de pressurização do ar, é sabido que o modelo não calcula, pois trabalha com a hipótese de ventilação ideal. Porém, observa-se que, nos experimentos, embora se adote a ventilação ideal, percebe-se que uma pequena pressurização influencia na dinâmica do enchimento, podendo assim justificar boa parte das discordâncias dos dados numéricos com os experimentais.

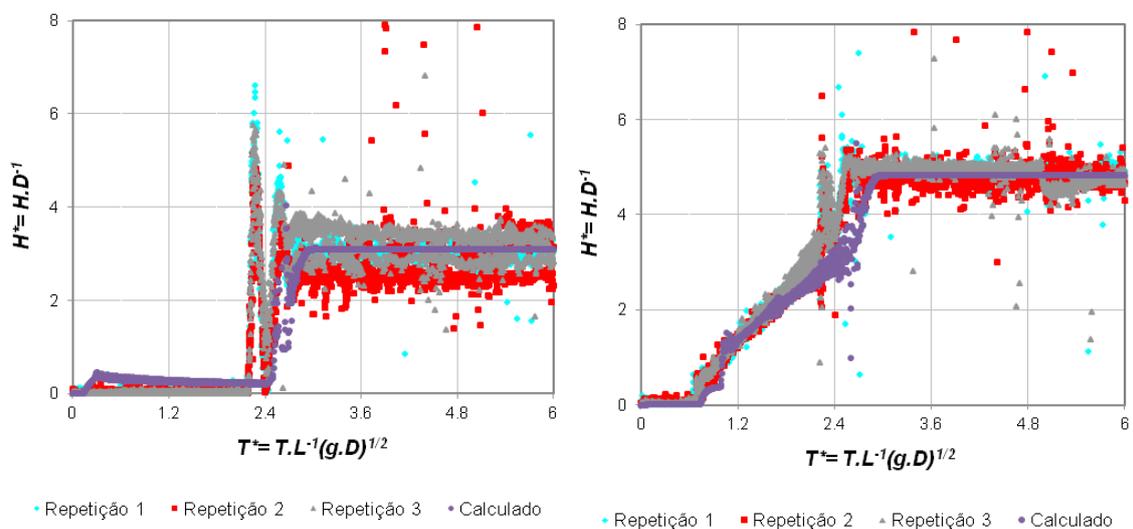


Figura 6.39: Dados experimentais e numéricos $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,27$ de montante e jusante.

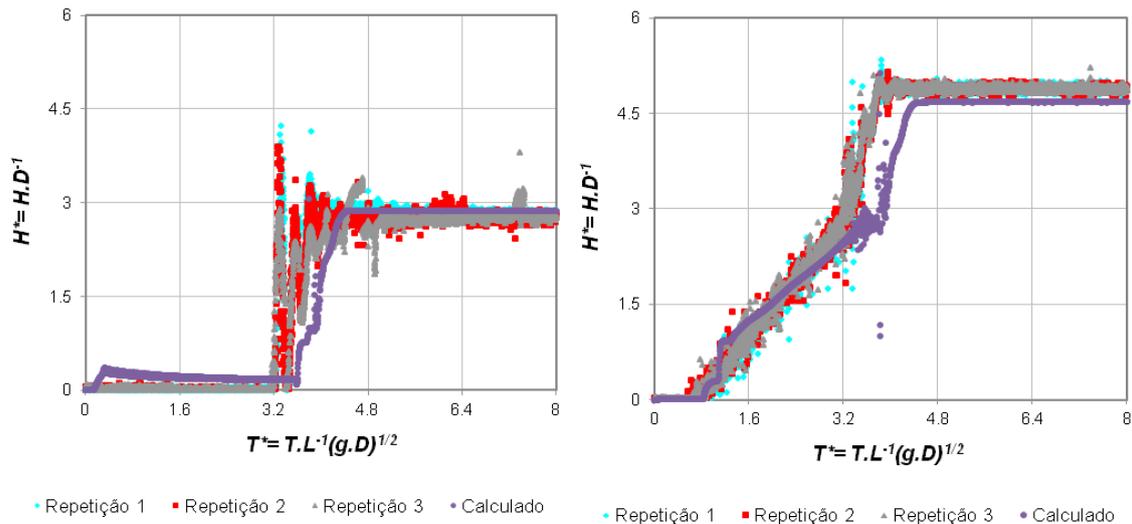


Figura 6.40: Dados experimentais e numéricos $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,27$ de montante e jusante.

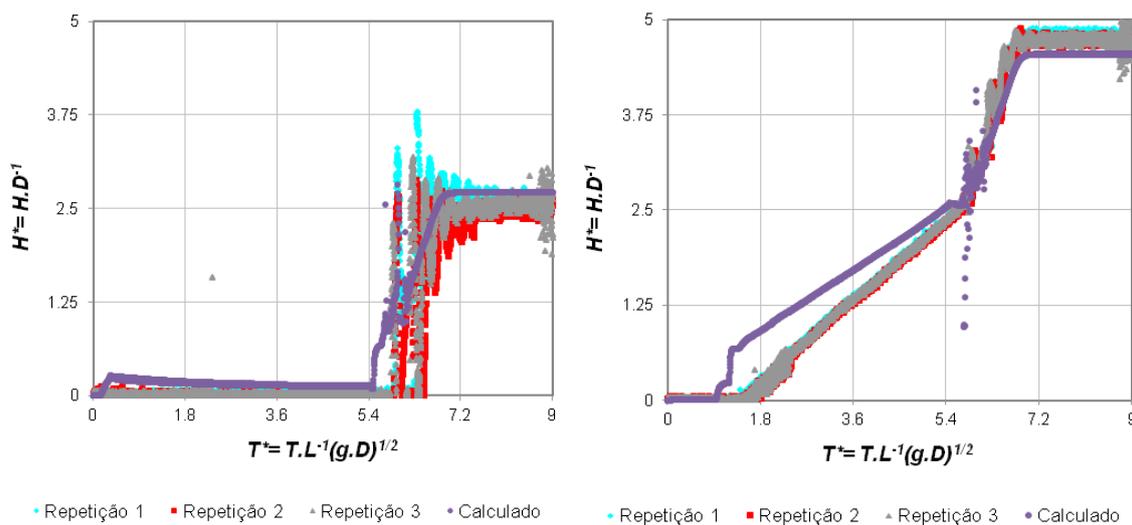


Figura 6.41: Dados experimentais e numéricos $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,27$ de montante e jusante.

O modelo desenvolvido por Leite (2009) também possui uma satisfatória predição para os casos de vazão máxima e média. Quanto ao tempo associado aos eventos descritos, como pressurização, eliminação do ar, extravasamento, a predição foi mais adequada para os ensaios de vazão intermediária, na qual a diferença entre o tempo utilizado para o evento na simulação numérica e para o experimento chegou ao máximo de 3,0 s. Para ensaios de vazão máxima, em média, a predição levava 5,0 s a mais. A diferença mais significativa ocorreu para os ensaios de mínima vazão, que gastava, em média, cerca de 12,0 s a mais do que o tempo utilizado no experimento. Quanto à previsão de pressurização do ar, houve

uma ótima aproximação para o ensaio de vazão máxima e diâmetro intermediário e uma boa aproximação para vazão mínima e diâmetro mínimo. Para os demais casos a divergência chegou a cerca de 40% menor do que os valores acompanhados nos experimentos.

As hidrógrafas de pressão resultantes da simulação numérica com o modelo de Leite (2009) são apresentadas nas Figuras 6.42, 6.43 e 6.44. Ressalta-se que no início da simulação, o modelo adota que na parte mais baixa da adutora a seção está preenchida com água aguardando interferência da frente de enchimento. Por esse motivo, pode-se perceber nos gráficos abaixo que no momento inicial a carga é $H^*=D$.

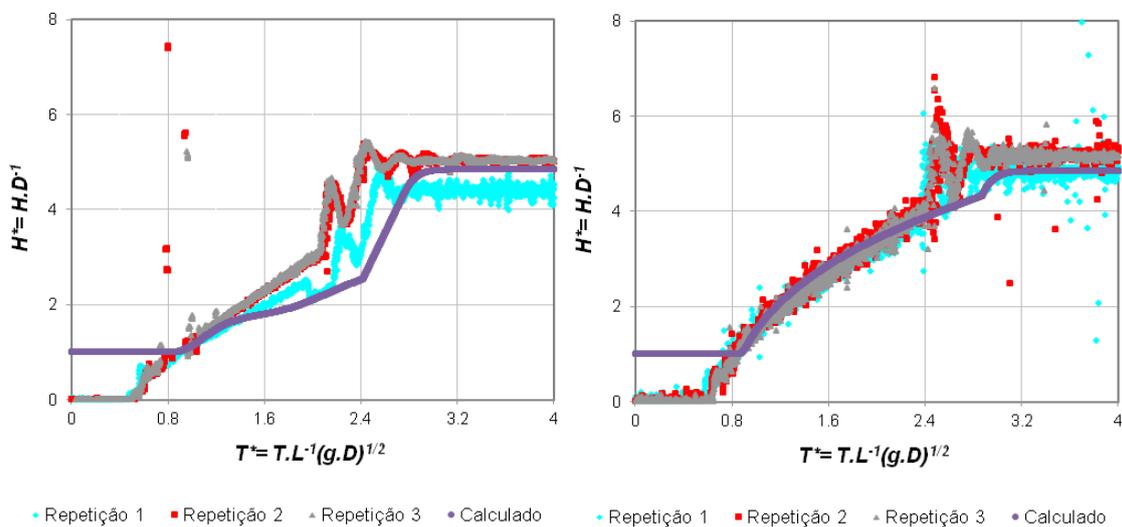


Figura 6.42: Dados experimentais e numéricos de jusante com $Q^* = 0,30$, $D^* = 0,18$ e $D^* = 0,09$.

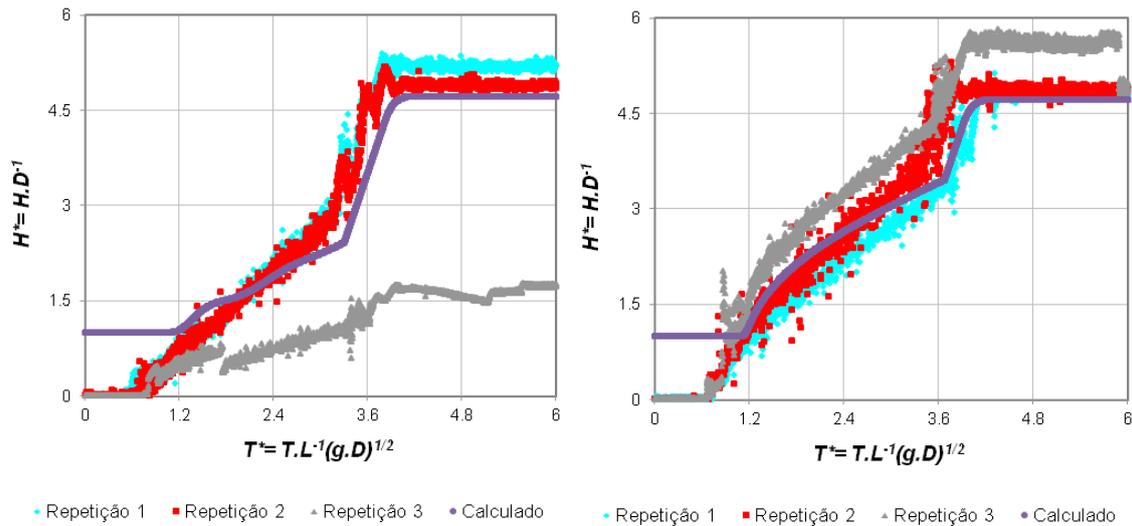


Figura 6.43: Dados experimentais e numéricos de jusante com $Q^* = 0,20$, $D^* = 0,18$ e $D^* = 0,09$.

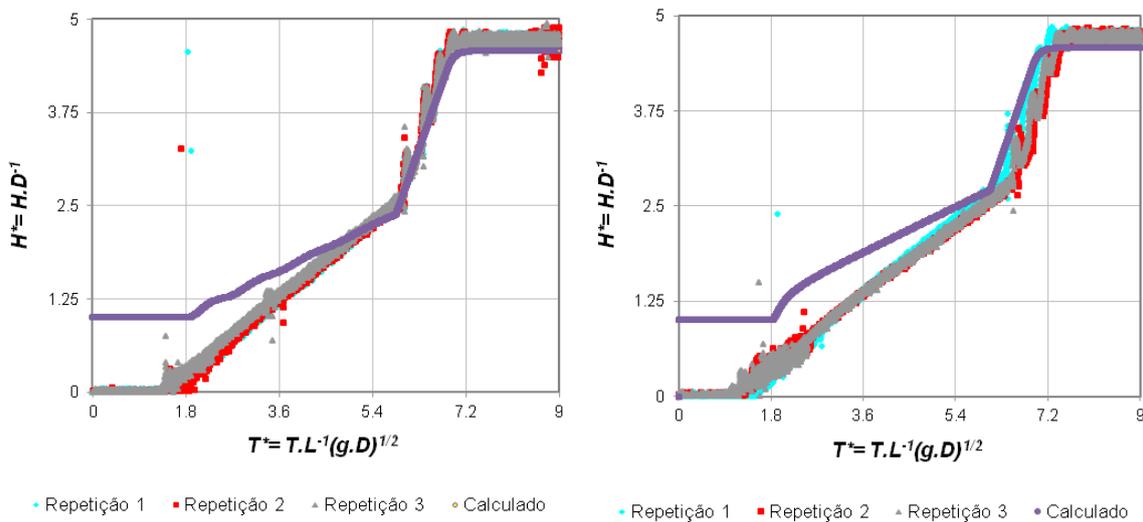


Figura 6.44: Dados experimentais e numéricos de jusante com $Q^* = 0,10$, $D^* = 0,18$ e $D^* = 0,09$.

De uma maneira geral, avaliou-se que os modelos utilizados apresentam uma boa concordância de previsão dos eventos associados ao enchimento gradual de adutoras, quando se avalia a evolução conceitual de cada modelo e o que se tinha para estudos em adutoras. Essa pesquisa veio no intuito de gerar informações para melhora dos modelos utilizados, ou concepção de novos.

7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O enchimento de adutoras é um fenômeno transiente de grande relevância por ocorrer frequentemente e pelo potencial de causar danos estruturais aos condutos, e, eventualmente, a destruição dos mesmos. A modelagem desse escoamento em adutoras vem sendo aperfeiçoada com a abordagem transiente e a da pressurização do ar.

Com esse enfoque, pesquisas, tanto de cunho experimental quanto numérico, são fundamentais para aumentar o entendimento acerca das interações entre o ar e a água durante os eventos de enchimento onde a ventilação do ar presente é limitada. Esta pesquisa buscou contribuir no sentido de entender melhor o enchimento em adutoras abordando graus distintos de ventilação e vazão, comparando-o a predição numérica.

Nos experimentos executados, durante os momentos iniciais do enchimento, o escoamento ocorreu em regime supercrítico e encontrando a inclinação adversa, formou-se o ressalto hidráulico. Essa seção mais baixa da adutora é totalmente preenchida pela água formando um selo hídrico. O volume de ar que atravessa esse selo é desprezível. Essa pequena parte de ar admitido no escoamento pelo ressalto hidráulico tende a voltar para montante no formato de *slug flow*. Logo, essa informação pode ser adotada como premissa em futuras modelagens.

Com a formação do ressalto, a vazão é distribuída não uniformemente entre as duas colunas, a de enchimento e a retrógrada. Nas condições em que ocorreram os experimentos, pôde-se adotar que a vazão volumétrica de escape do ar pelo orifício é igual à vazão volumétrica da coluna retrógrada de água. Isso, devido ao fato de que a compressão do ar pôde ser desconsiderada, visto que a variação da densidade do ar foi muito pequena e as relações de diâmetro para ventilação adotadas nessa pesquisa operaram com descarga de ar sem estrangulamento. Ressalta-se que essas condições podem não coincidir com a operação de adutoras reais onde pressões são mais elevadas e a compressão do ar mais pronunciada. Quanto à frente inicial de enchimento, ainda antes da formação do selo hídrico, é importante ressaltar sua morfologia, embora, já comprovado por outras pesquisas, essa frente é quase horizontal mesmo para a vazão máxima. Isso

ênfatiza que os modelos numéricos de simulação não devem desprezar essa feição em sua formulação a fim de não prejudicar a qualidade da predição.

Os resultados experimentais permitiram observar que a diminuição da área do orifício instalado para ventilação é capaz de aumentar o tempo necessário para eliminação do ar, em até 10%, e chega ao acréscimo de 13% para completar o enchimento da adutora. Em termos práticos, se uma adutora com deficiência de ventilação leva dez horas para o enchimento total, o tempo poderia ser reduzido em mais de uma hora com uma ventilação mais adequada. Nesse caso economia de horas e recursos das empresas de saneamento.

Os resultados das simulações numéricas apresentaram, de maneira geral, uma boa concordância de previsão de tempo dos principais eventos associados ao enchimento gradual de adutoras. Quanto à magnitude de alguns parâmetros, a concordância não é satisfatória. Porém, é importante salientar, que se deve considerar a evolução conceitual de cada modelo utilizado com o que se tinha antes para estudos em adutoras, demonstrando assim, a grande relevância desses modelos. Dessa maneira, são desejáveis adequações para uma previsão melhor, no intuito de auxiliar o dimensionamento adequado da ventilação de adutoras. Essa pesquisa veio no intuito de gerar informações para adequações e melhoras dos modelos utilizados ou concepção de novos.

São sugeridas pesquisas futuras com adutoras em escala de laboratório ou pesquisas em campo envolvendo comprimento e diâmetros de condutos mais próximos dos observados em sistemas adutores. Sugere-se também o uso de geometrias mais complexas, com maior número de pontos baixos intermediários. Outro enfoque a analisar, é a presença inicial de água na adutora e sua influência na morfologia e dinâmica da frente de enchimento e pressurização do bolsão de ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWWA, American Water Works Association, (2004). *Steel Water Pipe: A Guide for Design and Installation (M11)*. 4ª ed. 241p.
- Estrada, O. P. (2007). *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*. Tese de Doutorado, Universidade de Stuttgart, Instituto de Hidráulica, Alemanha, 176p.
- Escarameia, M., Dabrowski, C., Gahan, C., & Lauchlan, C. (2005). *Experimental and numerical studies on movement of air in water pipelines*. HR Wallingford Report SR661.
- Falvey, H. T., (1980). "Air-water flow in hydraulic systems". *USBR Engineering Monograph*, No. 41, Denver, Colorado, USA.
- Fuertes, V. S. Arregui, F., Cabrera, E. Iglesias, P. L. (2000). "Experimental setup of entrapped air pockets model validation". *Proceeding of the 8th International Conference on Pressure Surges – Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems*, BHRA, The Hague, Netherlands, pp. 133-145.
- Guizani, M., Vasconcelos, J. G., Wright, S. J., Maalel, K. (2006). "Rapid Filling of Empty Pipes". In: *Computational Hydraulics International*. (Org.). Intelligent Modeling of Urban Water Systems. Toronto: Computational Hydraulics International, v. 14, p. 463-482.
- Harper International (2009). Disponível em: <<http://www.solutionsbyharper.com/page.asp?PageID=6273>>. Acesso em: 11/11/2012, 18:00h.
- Izquierdo, J., Fuertes, J., Cabrera, E., Iglesias, P. L., Garcia-Serra, J. (1999). "Pipeline start-up with entrapped air". *Journal American Water Works Association*. **37**(05), 579-590.
- Kalinske, A.A., and Bliss, P.H.(1943). *Removal of air from pipelines by flowing water*. ASCE, Vol. 13, No 10, pp 480-482.
- Kalinske, A.A., and Robertson, J.M.(1943). *Closed conduit flow*. ASCE Vol. 108, pp 1453-1516, 1943.
- Kent, J.C. (1952). *The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes*. Doctoral thesis, University of California, Berkley, California, USA.
- Lauchlan, C., Escarameia, M., May, R., Burrows, R., & Gahan, C. (2005). *Air in Pipelines: A literature review*, Report SR **649**. HR Wallingford.

- Leite, M.G. (2009). *Desenvolvimento de modelo numérico para enchimento gradual de adutoras considerando a pressurização do ar*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Li, J., McCoequodale, A. (1999). “Modeling mixed flow in storm sewers.” *Journal of Hydraulic Engineering*. **125**(11), 1170-1180.
- Lingireddy, S., Wood, D. J., Zloczower, N. (2004). “ Pressure surges in pipeline systems resulting from air releases”. *Journal American Water Works Association*. **96**(07), 88-94.
- Liou, C. P., Hunt, W. A. (1996). “Filling of Pipelines with Undulating Elevation Profiles”. *Journal of Hydraulic Engineering*, **122**(10), 534-539.
- Little, M.J. (2002) Air Transport in Water and Effluent Pipelines, 2nd Internacional Conference on Marine Waste Discharges, Istanbul, pp 16-20.
- Little, M. J., Powell, J. C., Clark (2008). “Air movement in water pipelines – some new developments”. *Proc. International Conference BHR Group* , 111- 118.
- Porto, R. de M. (2005). *Hidráulica Básica*. 3. ed., rev. São Carlos, SP: EESC-USP, 2006. xix, 519 p.
- Quintela, A. de C. (1932). *Hidraulica*. Lisboa: Fund C Gulbenkian, 1981. 539 p.
- Streeter, V. L. (1974). *Mecânica dos Fluidos*. McGraw- Hill, São Paulo, Brasil, 736 p.
- Liu, T. (2012) “Air-pocket transport in conjunction with bottom-outlet conduits for dams”. TRITA LWR Lic 2062.
- Tullis, J. P. (1989). *Hydraulics of Pipelines – Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. Wiley Interscience, New York. United States of America. 266p.
- Vasconcelos, Jose G., Wright, Steven J., Roe, P. L. (2006). “Improved Simulation of Flow Regime Transition in Sewers: Two-Component Pressure Approach”. *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**(6), 553-562.
- Vasconcelos, J. G. (2007). “Modelo matemático para simulação de enchimento de adutoras”. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007, Belo Horizonte. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.
- Vasconcelos, J. G., Wrigth, S. J. (2008). “Rapid Flow Startup in Filled Horizontal Pipelines”. *Journal of Hydraulic Engineering*, **134**(7), 984-992.
- Wallis, G. B. (1969). *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw- Hill, New York, United States of America. 409p.

- Wisner, P.E., Mohsen, F.N. and Kouwen, N. (1975). "Removal of air from waterlines by hydraulic means". *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 101, HY2, pp. 243-25.
- Wylie, E. B. e Streeter, V. L. (1983). *Fluid Transients*. FEB PRESS, Michigan, United States of America. 384p.
- Wylie, E. B. e Streeter, V. L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America.
- Zhou, F., Hicks, F. E., & Steffler, P. M. (2002). "Transient Flow in a Rapid Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air". *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(6), 625-634.