

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ANÁLISE DA DINÂMICA DO ESCOAMENTO A JUSANTE DE
COMPORTA DE CONTROLE DE VAZÃO EM AQUEDUTO DE
ECLUSA DE NAVEGAÇÃO**

Cristiane Collet Battiston

Tese de Doutorado

Porto Alegre, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ANÁLISE DA DINÂMICA DO ESCOAMENTO A JUSANTE DE COMPORTA DE
CONTROLE DE VAZÃO EM AQUEDUTO DE ECLUSA DE NAVEGAÇÃO**

MSc. ENG^a CIVIL CRISTIANE COLLET BATTISTON

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

Co-orientadora Prof^a.Dr^a. Edith Beatriz Camaño Schettini

Orientador no Doutorado Sanduíche Prof. Dr. Fabián A. Bombardelli UC Davis

Banca Examinadora

Prof. Dr. Fabián A. Bombardelli

University of California - UC Davis - EUA

Prof. Dr. Raul A. Lopardo

Instituto Nacional del Agua - INA Argentina

Prof. Dr. Luiz Rafael Palmier

UFMG

Prof^a. Dr^a. Rejane de César Oliveski

UNISINOS

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira

IPH/UFRGS

Porto Alegre, 6 de agosto de 2013.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Marcelo Giulian Marques, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e co-orientado pela Prof^a. Edith Beatriz Camaño Schettini, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e pelo Prof. Fabián A. Bombardelli, da Universidade da Califórnia, em Davis.

A realização desta pesquisa teve o apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do IPH/UFRGS, do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) de FURNAS Centrais Elétricas S/A, e da Universidade da Califórnia.

Meus agradecimentos:

- Aos orientadores: Prof. Marcelo Giulian Marques, Prof^a. Edith Beatriz Camaño Schettini e Prof. Fabián A. Bombardelli;
- Aos colaboradores, técnicos, estagiários e bolsistas do atual Laboratório de Obras Hidráulicas, mas, para mim, eterno Pavilhão Marítimo, e do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) de FURNAS Centrais Elétricas S/A, que contribuíram com esta pesquisa;
- De forma especial, ao amigo Alexandre Mees, por sua inestimável colaboração, à amiga Fernanda Tonial, ao Leandro do Espírito Santo Soares, ao Sérgio Nicolau de Moura Flores e à Roberta Motta. Essa turma ajudou muito e sem ela nada teria dado certo; e
- Àqueles que não contribuíram diretamente com a pesquisa, mas que foram importantes pelo incentivo, pelo suporte e pela cobrança, em especial: Luiz, Salete, Duda, Vó, Neu, Pilão, Dani, Elvis, Cris, Alana, Jacke, Lilian, Van, Néia, Fabi, Thiago, Angélica, Amandita, Pablo, Érika, Lynne, Norbie, Débora, Afonso, Marcel, Polly, Adriana e minhas famílias de Cascavel, Corbélia, Erechim, Porto Alegre, Davis e Brasília.

RESUMO

As Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário apresentam metas ambiciosas para os próximos anos quanto à construção de eclusas e ao aumento da participação do transporte aquaviário de carga na matriz brasileira.

A bibliografia expõe que os custos são otimizados quando um desnível é transposto com a construção do menor número de eclusas, o que resulta na busca pela transposição de desníveis significativos com a execução de eclusas com uma única câmara. No entanto, problemas hidráulicos encontrados junto às comportas de enchimento e esvaziamento estão entre as principais limitações para o aumento da altura de queda das eclusas.

Os diferenciais de pressão entre as faces de montante e jusante das comportas e a variação do seu grau de abertura durante as operações de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação de média e alta queda geram escoamentos turbulentos, com velocidades e pressões capazes de produzir danos às estruturas.

Com o objetivo de analisar os parâmetros hidráulicos do escoamento médio a jusante de comportas dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas, do tipo segmento invertida, e as pressões instantâneas ao longo do teto e da base do conduto, de forma a identificar e caracterizar padrões de comportamento que auxiliem na elaboração de projetos e no aperfeiçoamento dessas estruturas, foram conduzidas duas investigações complementares, a experimental e a numérica.

A investigação experimental, desenvolvida no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, proporcionou a geração de dados discretos de pressão instantânea ao longo do teto e da base do conduto para 53 condições de abertura e vazão, para escoamento em regime permanente. A investigação numérica, realizada com o software *Flow-3D*®, de Dinâmica de Fluidos Computacional, viabilizou a geração de dados do escoamento médio no interior do conduto para 12 condições de abertura e vazão, que reproduziam as simulações experimentais.

Os resultados das simulações realizadas no *Flow-3D*® com modelo de turbulência $k-\epsilon$ demonstraram a sua aplicabilidade no estudo do escoamento médio a jusante de comportas de sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas. O modelo numérico reproduziu os dados experimentais de pressão a montante da comporta e os formatos das curvas de pressão ao longo da base e do teto do conduto a jusante da comporta, apresentando resultados mais aderentes para a base.

Para as condições operacionais com a comporta parcialmente aberta, as menores pressões ocorreram no teto do conduto próximo à comporta, região de recirculação do escoamento, e junto ao terminal da comporta.

A partir da análise dos dados foi possível a caracterização do comportamento das pressões médias, das flutuações de pressão e das pressões máximas e mínimas ao longo da base e do teto do conduto por meio da relação entre coeficientes adimensionais de posição e de pressão.

Palavras-chave: comporta segmento invertida, eclusa, pressões médias, pressões instantâneas, hidráulica experimental, dinâmica de fluidos computacional, modelo de turbulência $k-\epsilon$.

ABSTRACT

ANALYSIS OF FLOW DYNAMIC DOWNSTREAM OF LOCK VALVES

Brazilian Waterways Policy has ambitious goals for constructing navigation locks and increasing the participation of the cargo transport through waterways in the national transport matrix.

Literature states that costs are optimized by the construction of fewer locks for the transposition of water levels by vessels, which results in the search for transposition of significant lifts by using navigation locks with single camera. However, the hydraulic problems in the filling and emptying systems, especially close to the valves, are among the major limitations to increase the lock lift.

During filling and emptying operations of medium and high-lift locks, the pressure difference between upstream and downstream sides of lock valve and its opening generate turbulent flows with associated flow velocities and pressures capable of damaging the structures.

In the current research, experimental and numerical investigations were conducted in order to analyze the mean flow through lock culvert valves and the instantaneous pressures behavior along the culvert roof and base, and to identify and to characterize hydraulic parameters which could be useful for project development and improvement of these structures.

The experimental research was conducted at the “Laboratório de Obras Hidráulicas” of the “Instituto de Pesquisas Hidráulicas” of the “Universidade Federal do Rio Grande do Sul” and provided the generation of discrete data of instantaneous pressure along the culvert roof and base for 53 conditions of flow and valve opening. Experimental simulations were performed with steady state flow. Numerical investigation applied the Computational Fluid Dynamics software Flow-3D® and produced information for the mean flow inside the culvert for 12 valve opening and flow conditions, which reproduced the experimental simulations.

The numerical results, obtained by using the k- ϵ turbulence model, demonstrated the applicability of Flow-3D® in the study of the mean flow downstream of lock culvert valves. The numerical model was able to reproduce the experimental data of pressure along the culvert base and roof presenting more accuracy to base data.

For partially open gate conditions, the lowest pressures were verified next to the valve lip and at the downstream culvert roof close to the valve, which correspond to the recirculating flow region.

From data analysis it was possible to characterize the behavior of the mean pressure, pressure fluctuations and extreme pressures along the culvert base and roof by the relationship between dimensionless coefficients of position and pressure.

Key-words: lock valve, reverse Tainter gate, navigation lock, mean pressure, instantaneous pressure, experimental hydraulic, Computational Fluid Dynamics, k- ϵ turbulence model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS.....	XXII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XXIV
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação do trabalho	1
1.2 Objetivo geral	5
1.3 Objetivos específicos.....	6
1.4 Organização do trabalho	6
CAPÍTULO II.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Eclusas de navegação e seus sistemas de controle de fluxo.....	7
2.1.1 Problemas hidráulicos relacionados à queda.....	14
2.1.2 Comportas de controle de vazão em eclusas	15
2.2 Escoamento sob comportas.....	19
2.2.1 Características hidráulicas fundamentais	19
2.2.2 Esforços hidrodinâmicos e vibração.....	23
2.2.3 Escoamento a jusante de comportas em condutos.....	26
2.3 Jatos parietais	37
2.4 Cavitação.....	43
2.4.1 Tipos de cavitação	44
2.4.2 Parâmetros característicos	45
2.4.3 Cavitação em ressaltos hidráulicos.....	47
2.4.4 Cavitação a jusante de comportas de eclusas	50

2.5	Modelagem do escoamento em sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação	54
2.5.1	Modelagens físicas	54
2.5.2	Modelagens numéricas	60
CAPÍTULO III		71
3	METODOLOGIA	71
3.1	Investigação experimental	71
3.1.1	Bancada de ensaios	71
3.1.2	Aquisição de dados	75
3.1.3	Simulações realizadas	80
3.2	Investigação numérica	87
3.2.1	<i>Flow 3D®</i> (Flow Science, 2005)	87
3.2.2	Simulações realizadas	89
CAPÍTULO IV		99
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1	Coefficientes hidráulicos do escoamento	99
4.1.1	Coefficiente de perda de carga linear e tipo de escoamento	99
4.1.2	Coefficiente de perda de carga devida à comporta	100
4.1.3	Coefficiente de contração do escoamento	101
4.2	Pressões médias junto à base e ao teto do conduto	103
4.2.1	Pressões médias mínimas	109
4.2.2	Coefficientes de pressão média junto à base e ao teto do conduto	113
4.3	Validação dos resultados das simulações numéricas em comparação com os dados das simulações experimentais	126
4.3.1	Pressão média	126
4.3.2	Velocidades médias na direção x	132
4.4	Comportamento do escoamento médio no interior do conduto	136
4.4.1	Escoamento com a comporta 100% aberta	136
4.4.2	Escoamento com a comporta parcialmente aberta	138

4.4.3	Influência da vazão no escoamento com a comporta parcialmente aberta – caso com 60% de abertura	148
4.4.4	Considerações sobre as áreas da estrutura submetidas às maiores solicitações	157
4.5	Pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto.....	161
4.5.1	Flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto.....	161
4.5.2	Pressões mínimas junto à base e ao teto do conduto	170
4.5.3	Pressões máximas junto à base e ao teto do conduto	184
4.5.4	Coefficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas.....	197
 CAPÍTULO V.....		204
5	CONCLUSÕES	204
5.1	Caracterização da distribuição das pressões médias junto ao teto e à base do conduto.	205
5.2	Avaliação da aplicabilidade do software de Dinâmica de Fluidos Computacional, Flow 3D®, na simulação do escoamento médio	206
5.3	Caracterização do escoamento médio.....	207
5.4	Identificação das áreas da estrutura submetidas às maiores solicitações	208
5.5	Caracterização do comportamento das pressões instantâneas e de seus valores extremos junto ao teto e à base do conduto	209
 CAPÍTULO VI.....		211
6	RECOMENDAÇÕES	211
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		212
 APÊNDICE.....		221

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Perfil de uma eclusa de navegação de câmara simples.	4
Figura 1.2 - Desenho esquemático do fluxo a jusante da comporta de controle de fluxo dos sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas.	5
Figura 2.1 - Barragem e eclusa de navegação Holt.	7
Figura 2.2 - Componentes das eclusas de navegação. (a) Planta. (b) Corte longitudinal. (c) Corte Transversal. (d) Modelo. (e) Foto de um sistema de enchimento.	8
Figura 2.3 - Sistema simplificado - enchimento pelas portas. (a) Representação esquemática. (b) Imagem.	10
Figura 2.4 - Sistema complexo - enchimento frontal com dissipadores de energia.	10
Figura 2.5 - Sistema de enchimento e esvaziamento pelos muros laterais. (a) Representação esquemática do sistema com orifícios distribuídos longitudinalmente com conexão direta entre o aqueduto e a câmara. (b) Representação esquemática do sistema com derivações dos aquedutos para o interior da câmara. (c) Imagem de (a).	11
Figura 2.6 - Sistemas de enchimento e esvaziamento hidraulicamente balanceados. (a) Representação esquemática – sistema com 4 difusores. (b) Representação esquemática – sistema com 8 difusores. (c) Imagem – sistema com 4 difusores.	12
Figura 2.7 - Sistema para redução do consumo de água por eclusagem (<i>Water Saving Basins – WSBs</i>).	14
Figura 2.8 - Desenho esquemático da instalação de uma comporta plana no aqueduto de uma eclusa.	16
Figura 2.9 - Desenho esquemático da instalação de uma comporta segmento, em sua posição regular, no aqueduto de uma eclusa.	17
Figura 2.10 - Desenho esquemático da instalação de uma comporta segmento invertida no aqueduto de uma eclusa.	17
Figura 2.11 - Tipos básicos de comporta segmento invertida utilizados em aquedutos de eclusas de navegação. (a) Estruturada horizontalmente. (b) De duas chapas de paramento. (c) Estruturada verticalmente.	19
Figura 2.12 - escoamento sob comportas.	20
Figura 2.13 - Coeficiente de contração (C_c) para comportas segmento invertidas.	21
Figura 2.14 - Coeficiente de perda de carga localizada para comportas segmento invertidas.	23
Figura 2.15 - Esforços de <i>downpull</i> e de <i>uplift</i> em comportas de eclusas.	25
Figura 2.16 - Classificação dos tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos.	27
Figura 2.17 - Ressalto hidráulico livre.	28
Figura 2.18 - Desenho esquemático de ressalto hidráulico em conduto.	30
Figura 2.19 - Cl em função de F_L	32
Figura 2.20 - Comprimento do ressalto.	33

Figura 2.21 - Incorporação de ar pelo ressalto hidráulico.	34
Figura 2.22 - Incorporação de ar pelo ressalto hidráulico – Comparação das equações de USACE (1977) e Kalinske e Robertson (1982).	35
Figura 2.23 - Relação gráfica entre o coeficiente C_s e a velocidade média do escoamento.	37
Figura 2.24 - Esquema de definições de um jato plano turbulento de parede.	37
Figura 2.25 - Comparação dos dados de um ressalto submerso com as curvas características de um ressalto hidráulico livre e um jato parietal clássico.	40
Figura 2.26 - Desenho esquemático de jato parietal submerso. (a) Zonas do escoamento. (b) Típico perfil de velocidades na direção x para a zona completamente desenvolvida.	41
Figura 2.27 - Características do escoamento de jatos planos confinados.	42
Figura 2.28 - Exemplo de jato plano confinado com recirculação junto às paredes.	43
Figura 2.29 - Campos de linhas isobáricas utilizando-se dos valores para CP	46
Figura 2.30 - Parâmetro de pressões flutuantes para um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro.	48
Figura 2.31 - Parâmetro de pressões flutuantes para um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta.	49
Figura 2.32 - Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversas submergências e $F_R=4,5$	50
Figura 2.33 - Comportamento do índice de cavitação para o sistema de enchimento da eclusa 1 de Tucuruí.	51
Figura 2.34 - Expansão no teto do aqueduto.	52
Figura 2.35 - Geometria com rebaixamento da comporta e introdução de expansões laterais.	53
Figura 2.36 - Geometria com expansões na base e no teto.	54
Figura 2.37 - Modelo físico utilizado por Palauro (2012).	58
Figura 2.38 - Malhas de cálculo utilizadas no trabalho de Kermani e Kavianpour (2007). (a) Para 60% de abertura da comporta plana. (b) Para 10% de abertura da comporta segmento.	62
Figura 2.39 - Malha de cálculo de elementos quadrilaterais isoparamétricos de quatro nós utilizados no trabalho de Andrade e Amorim (1997).	63
Figura 2.40 - Resultado das simulações numéricas para a distribuição de pressão com 70% de abertura da comporta.	64
Figura 2.41 - Comparativo entre dados experimentais e os resultados das simulações numéricas para a distribuição de pressões sobre a comporta com 70% de abertura.	64
Figura 2.42 - Campos de velocidade na direção x resultantes das simulações de Hammack e Stockstill (2009). ..	66
Figura 2.43 - Linhas de corrente resultantes das simulações de Hammack e Stockstill (2009).	67
Figura 2.44 - Campos de velocidade na direção x combinados com as linhas de corrente resultantes das simulações de Hammack e Stockstill (2011).	68
Figura 2.45 - Velocidades na direção x e linhas de corrente resultantes das simulações de Menéndez <i>et al.</i> (2010).	70

Figura 3.1 - Desenho esquemático da bancada de ensaios - Perfil.	72
Figura 3.2 - Desenho esquemático da bancada de ensaios - Planta.	72
Figura 3.3 - (a) Vista do reservatório, condutos e canal de restituição. (b) Vista do reservatório, condutos e tubulação do sistema de alimentação.	73
Figura 3.4 - Sistema de registro da abertura da comporta. (a) Esquema. (b) Foto. (c) Detalhe da graduação da régua.	76
Figura 3.5 - Macromedidor eletromagnético de vazão.	76
Figura 3.6 - Posição dos furos para instalação das tomadas de pressão.	77
Figura 3.7 - Esquema de instalação dos transdutores de pressão.	80
Figura 3.8 - Sistema de recepção e armazenagem de dados.	80
Figura 3.9 - Esquema das condições de ensaio.	81
Figura 3.10 - Eliminação de ar dos piezômetros.	83
Figura 3.11 - Piezômetros.	83
Figura 3.12 - Preenchimento com água do espaço do orifício da membrana do transdutor.	83
Figura 3.13 - Transdutores, piezômetro e furos não utilizados na base do conduto (parte elétrica protegida da água).	83
Figura 3.14 - Vista 1 da estrutura com os equipamentos de medição de pressão.	83
Figura 3.15 - Vista 2 da estrutura com os equipamentos de medição de pressão.	83
Figura 3.16 - Detalhe dos transdutores da base do conduto.	84
Figura 3.17 - Detalhe dos transdutores do teto do conduto.	84
Figura 3.18 - Detalhe 1 dos transdutores conectados ao sistema de registro e armazenamento de dados.	84
Figura 3.19 - Detalhe 2 dos transdutores conectados ao sistema de registro e armazenamento de dados.	84
Figura 3.20 - Distribuição dos instrumentos de medição de pressão.	86
Figura 3.21 - Visualização de uma tela do <i>FLOW-3D</i> [®]	88
Figura 3.22 - Blocos de cálculo e objetos sólidos que representam a estrutura em estudos utilizados nas simulações no <i>FLOW-3D</i> [®]	90
Figura 3.23 - Avaliação do tamanho das células da malha de cálculo – Comportamento da energia cinética turbulenta na seção $x = 2,51$ m (jusante da comporta).	93
Figura 3.24 - Avaliação do tamanho das células da malha de cálculo – Comportamento da dissipação de energia cinética turbulenta na seção $x = 2,51$ m (jusante da comporta).	94
Figura 3.25 - Detalhe da malha de cálculo utilizada nas simulações numéricas.	94
Figura 3.26 - Perfil de velocidade média na direção x para a condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s – Comparação de valores de energia cinética turbulenta (TKE) como condição de contorno de montante.	96

Figura 4.1 - Coeficiente f do conduto de acrílico - seção principal de ensaios.....	100
Figura 4.2 - Coeficiente de perda de carga na comporta segmento invertida – comparação com os dados de USACE (1977).	101
Figura 4.3 - Coeficiente de contração para a comporta segmento invertida – comparação com os dados de USACE (2011).	102
Figura 4.4 - Pressões médias na base do conduto - 100% de abertura da comporta.....	103
Figura 4.5 - Pressões médias no teto do conduto – 100% de abertura da comporta.....	103
Figura 4.6 - Pressões médias na base do conduto - 10% de abertura da comporta.....	104
Figura 4.7 - Pressões médias no teto do conduto - 10% de abertura da comporta.....	104
Figura 4.8 - Pressões médias na base do conduto - 30% de abertura da comporta.....	104
Figura 4.9 - Pressões médias no teto do conduto - 30% de abertura da comporta.....	104
Figura 4.10 - Pressões médias na base do conduto - 50% de abertura da comporta.....	104
Figura 4.11 - Pressões médias no teto do conduto - 50% de abertura da comporta.....	104
Figura 4.12 - Pressões médias na base do conduto - 60% de abertura da comporta.....	105
Figura 4.13 - Pressões médias no teto do conduto - 60% de abertura da comporta.....	105
Figura 4.14 - Pressões médias na base do conduto - 70% de abertura da comporta.....	105
Figura 4.15 - Pressões médias no teto do conduto - 70% de abertura da comporta.....	105
Figura 4.16 - Pressões médias na base do conduto - 80% de abertura da comporta.....	105
Figura 4.17 - Pressões médias no teto do conduto - 80% de abertura da comporta.....	105
Figura 4.18 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 22 l/s.....	106
Figura 4.19 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 22 l/s.....	106
Figura 4.20 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 28 l/s.....	106
Figura 4.21 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 28 l/s.....	106
Figura 4.22 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 32 l/s.....	106
Figura 4.23 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 32 l/s.....	106
Figura 4.24 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 40 l/s.....	107
Figura 4.25 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 40 l/s.....	107
Figura 4.26 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 60 l/s.....	107
Figura 4.27 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 60 l/s.....	107
Figura 4.28 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 90 l/s.....	107
Figura 4.29 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 90 l/s.....	107
Figura 4.30 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 130 l/s.....	108

Figura 4.31 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 130 l/s.....	108
Figura 4.32 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 180 l/s.....	108
Figura 4.33 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 180 l/s.....	108
Figura 4.34 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 220 l/s.....	108
Figura 4.35 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 220 l/s.....	108
Figura 4.36 - Pressão média mínima registrada experimentalmente na base do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da vazão.	110
Figura 4.37 - Pressão média mínima registrada experimentalmente no teto do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da vazão.	110
Figura 4.38 - Comportamento da pressão média mínima na base do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta.....	110
Figura 4.39 - Comportamento da pressão média mínima no teto do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta.....	111
Figura 4.40 - Comportamento da pressão média mínima na base do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta, adimensionalizadas por D	112
Figura 4.41 - Comportamento da pressão média mínima no teto do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta, adimensionalizadas por D	112
Figura 4.42 - Condições de cada simulação experimental e o número de Reynolds correspondente.	114
Figura 4.43 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.	117
Figura 4.44 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.	117
Figura 4.45 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.	118
Figura 4.46 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.	118
Figura 4.47 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.	118
Figura 4.48 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.	119
Figura 4.49 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto.....	119
Figura 4.50 - Relação entre os coeficientes b_i da Equação 4.16 e o grau de abertura da comporta.....	120
Figura 4.51 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.	121
Figura 4.52 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.	122

Figura 4.53 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.	122
Figura 4.54 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.	122
Figura 4.55 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.	123
Figura 4.56 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.	123
Figura 4.57 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto.	123
Figura 4.58 - Relação entre os coeficientes t_i da Equação 4.17 e o grau de abertura da comporta.....	124
Figura 4.59 - Relação entre o valor mínimo do coeficiente de pressão média para a base e para o teto do conduto e o grau de abertura da comporta.....	125
Figura 4.60 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.	126
Figura 4.61 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.	126
Figura 4.62 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.	126
Figura 4.63 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.	126
Figura 4.64 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.....	127
Figura 4.65 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.....	127
Figura 4.66 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 28 l/s de vazão.	127
Figura 4.67 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 28 l/s de vazão.	127
Figura 4.68 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.	127
Figura 4.69 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.	127
Figura 4.70 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 40 l/s de vazão.	128
Figura 4.71 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 40 l/s de vazão.	128
Figura 4.72 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 60 l/s de vazão.	128
Figura 4.73 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 60 l/s de vazão.	128

Figura 4.74 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.	128
Figura 4.75 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.	128
Figura 4.76 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 130 l/s de vazão.....	129
Figura 4.77 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 130 l/s de vazão.....	129
Figura 4.78 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.....	129
Figura 4.79 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.....	129
Figura 4.80 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.....	129
Figura 4.81 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.....	129
Figura 4.82 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.....	130
Figura 4.83 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.....	130
Figura 4.84 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 10% de abertura da comporta e vazão de 32 l/s.....	133
Figura 4.85 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 30% de abertura da comporta e vazão de 90 l/s.....	133
Figura 4.86 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 90 l/s.....	134
Figura 4.87 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 50% de abertura da comporta e vazão de 180 l/s.....	134
Figura 4.88 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.....	134
Figura 4.89 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 100% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.....	135
Figura 4.90 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.....	136
Figura 4.91 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	136
Figura 4.92 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	137
Figura 4.93 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.....	137

Figura 4.94 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	137
Figura 4.95 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	137
Figura 4.96 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.	138
Figura 4.97 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.	139
Figura 4.98 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.	139
Figura 4.99 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.	139
Figura 4.100 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.	139
Figura 4.101 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.	140
Figura 4.102 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.	140
Figura 4.103 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.	140
Figura 4.104 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.	140
Figura 4.105 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.	141
Figura 4.106 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.	141
Figura 4.107 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.	141
Figura 4.108 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	141
Figura 4.109 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	142
Figura 4.110 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	142
Figura 4.111 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	142
Figura 4.112 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	142
Figura 4.113 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	143

Figura 4.114 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.....	143
Figura 4.115 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	143
Figura 4.116 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	143
Figura 4.117 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	144
Figura 4.118 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	144
Figura 4.119 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	144
Figura 4.120 - Comportamento das linhas de corrente comparadas com os perfis de velocidade média na direção x - Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	145
Figura 4.121 - Valores dos perfis de velocidade média na direção x - Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.	145
Figura 4.122 - Linhas de corrente e isolinhas de velocidade média nas direções x e z para a condição de 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	146
Figura 4.123 - Linhas de corrente e energia cinética turbulenta média – TKE, para a condição de 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.	148
Figura 4.124 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.	149
Figura 4.125 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.	150
Figura 4.126 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.	151
Figura 4.127 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.	152
Figura 4.128 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.	153
Figura 4.129 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.	154
Figura 4.130 - Relação entre a maior velocidade média na direção x (u) encontrada nas simulações numéricas e a vazão de referência (Q).	155
Figura 4.131 - Posição da maior velocidade média na direção x obtida nas simulações numéricas realizadas para a comporta com 60% de abertura.	156
Figura 4.132 - Posição da inversão de velocidades médias na direção x junto ao teto para as simulações numéricas realizadas para a comporta com 60% de abertura.	156
Figura 4.133 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 10% de abertura da comporta, 33 m^3/s e 30 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.	158

Figura 4.134 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 30% de abertura da comporta, 92 m ³ /s e 27 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.	158
Figura 4.135 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 50% de abertura da comporta, 184 m ³ /s e 26 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.	159
Figura 4.136 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 60% de abertura da comporta, 225 m ³ /s e 19 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.	159
Figura 4.137 - Flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e vazão de 32 l/s.	162
Figura 4.138 - Flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.	162
Figura 4.139 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.	164
Figura 4.140 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.	164
Figura 4.141 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.	165
Figura 4.142 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.	165
Figura 4.143 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.	165
Figura 4.144 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.	166
Figura 4.145 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto.	166
Figura 4.146 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.	168
Figura 4.147 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.	168
Figura 4.148 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.	168
Figura 4.149 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.	169
Figura 4.150 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.	169
Figura 4.151 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.	169
Figura 4.152 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto.	170
Figura 4.153 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.	173

Figura 4.154 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.....	173
Figura 4.155 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.....	173
Figura 4.156 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.....	174
Figura 4.157 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.....	174
Figura 4.158 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.....	174
Figura 4.159 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.....	175
Figura 4.160 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.....	175
Figura 4.161 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.....	175
Figura 4.162 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.....	176
Figura 4.163 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.....	176
Figura 4.164 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.....	176
Figura 4.165 - Ajustes de $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto.....	177
Figura 4.166 - Ajustes de $CP_{1\%}$ para a base do conduto.....	177
Figura 4.167 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.....	179
Figura 4.168 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.....	179
Figura 4.169 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.....	180
Figura 4.170 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.....	180
Figura 4.171 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.....	180
Figura 4.172 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.....	181
Figura 4.173 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.....	181
Figura 4.174 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.....	181
Figura 4.175 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.....	182
Figura 4.176 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.....	182
Figura 4.177 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.....	182
Figura 4.178 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.....	183
Figura 4.179 - Ajustes de $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto.....	183
Figura 4.180 - Ajustes de $CP_{1\%}$ para o teto do conduto.....	183
Figura 4.181 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.....	186
Figura 4.182 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.....	186
Figura 4.183 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.....	187
Figura 4.184 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.....	187

Figura 4.185 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.....	187
Figura 4.186 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.....	188
Figura 4.187 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.....	188
Figura 4.188 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.....	188
Figura 4.189 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.....	189
Figura 4.190 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.....	189
Figura 4.191 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.....	189
Figura 4.192 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.....	190
Figura 4.193 - Ajustes de $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto.	190
Figura 4.194 - Ajustes de $CP_{99\%}$ para a base do conduto.	190
Figura 4.195 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.	192
Figura 4.196 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.	193
Figura 4.197 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.	193
Figura 4.198 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.	193
Figura 4.199 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.	194
Figura 4.200 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.	194
Figura 4.201 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.	194
Figura 4.202 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.	195
Figura 4.203 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.	195
Figura 4.204 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.	195
Figura 4.205 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.	196
Figura 4.206 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.	196
Figura 4.207 - Ajustes de $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto.	196
Figura 4.208 - Ajustes de $CP_{99\%}$ para o teto do conduto.	197
Figura 4.209 - Coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e vazão de 32 l/s.	198
Figura 4.210 - Coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.	198
Figura 4.211 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.	199
Figura 4.212 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.	199
Figura 4.213 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.	200
Figura 4.214 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.	200

Figura 4.215 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.	200
Figura 4.216 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.	201
Figura 4.217 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.	201
Figura 4.218 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.	201
Figura 4.219 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.	202
Figura 4.220 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.	202
Figura 4.221 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.	202
Figura 4.222 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.	203

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Vias brasileiras economicamente navegadas.....	1
Tabela 1.2 - Principais eclusas em operação no Brasil.....	3
Tabela 2.1 - Escalas de semelhança entre modelo e protótipo.....	58
Tabela 2.2 - Condições das simulações realizadas por Hammack e Stockstill (2009).....	65
Tabela 2.3 - Coeficientes de descarga e de perda de carga na comporta obtidos das simulações de Hammack e Stockstill (2009).....	69
Tabela 3.1 - Características das bombas hidráulicas do sistema de alimentação.....	73
Tabela 3.2 - Distâncias finais entre os furos onde foram instalados equipamentos de medição de pressão.....	78
Tabela 3.3 - Características dos transdutores de pressão utilizados.....	79
Tabela 3.4 - Ensaios com medição de pressão média e comporta parcialmente aberta.....	85
Tabela 3.5 - Ensaios com medição de pressão instantânea.....	87
Tabela 3.6 - Vazões específicas calculadas a partir dos perfis de velocidade experimentais.....	95
Tabela 3.7 - Características dos computadores utilizados nas simulações numéricas.....	97
Tabela 3.8 - Condições iniciais e de contorno das simulações numéricas.....	97
Tabela 4.1 - Equações de estimativa da pressão média mínima em função do diferencial de pressão entre as tomadas 1MB e 37JB, adimensionalizados por D	113
Tabela 4.2 - Coeficientes para a Equação 4.16 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto.....	116
Tabela 4.3 - Coeficientes para a Equação 4.17 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto.....	121
Tabela 4.4 - Diferenças entre as simulações experimental (Exp) e numérica (Num) para a pressão média na base a montante da comporta ($P_{montante}$).....	131
Tabela 4.5 - Diferenças entre as simulações experimental (Exp) e numérica (Num) para a pressão média mínima na base a jusante da comporta.....	131
Tabela 4.6 - Diferenças entre as simulações experimental (Exp) e numérica (Num) para a pressão média mínima no teto a jusante da comporta.....	132
Tabela 4.7 - Coeficientes para a Equação 4.22 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto.....	163
Tabela 4.8 - Coeficientes para a Equação 4.23 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto.....	167
Tabela 4.9 - Coeficientes para a Equação 4.26 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto.....	172
Tabela 4.10 - Coeficientes para a Equação 4.27 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{1\%}$ para a base do conduto.....	172

Tabela 4.11 - Coeficientes para a Equação 4.28 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto.....	178
Tabela 4.12 - Coeficientes para a Equação 4.29 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{1\%}$ para o teto do conduto.....	178
Tabela 4.13 - Coeficientes para a Equação 4.32 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto.....	185
Tabela 4.14 - Coeficientes para a Equação 4.33 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99\%}$ para a base do conduto.....	186
Tabela 4.15 - Coeficientes para a Equação 4.34 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto.....	191
Tabela 4.16 - Coeficientes para a Equação 4.35 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99\%}$ para o teto do conduto.....	192

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras minúsculas

a	=	abertura da comporta ou bocal [L]
a^*	=	aceleração [LT^{-2}]
ab_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto
at_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto
b	=	largura do conduto [L]
b_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média na base do conduto
bb_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{1\%}$ para a base do conduto
bt_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{1\%}$ para o teto do conduto
c	=	velocidade de ascensão das bolhas em água parada [LT^{-1}]
c'	=	razão entre ct e c
cb_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto
ct_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto
ct	=	velocidade de ascensão das bolhas no escoamento em questão [LT^{-1}]
db_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99\%}$ para a base do conduto
dt_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99\%}$ para o teto do conduto
f	=	coeficiente de resistência ao escoamento
g	=	aceleração devida à gravidade [LT^{-2}]
h_f	=	perda de carga linear [L]
h_l	=	perda de carga singular [L]
Δh	=	diferença entre as cargas piezométricas medidas em duas seções distintas do aqueduto [L]
k	=	coeficiente de perda de carga singular
k^*	=	rugosidade equivalente [L]
n	=	coeficiente dependente da rugosidade das paredes [$TL^{-1/3}$]
n^*	=	coeficiente de forma
p'	=	amplitude da flutuação de pressão [$ML^{-1}T^{-2}$]
q	=	vazão específica [L^2T^{-1}]
s	=	comprimento da zona aerada [L]
t_i	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média no teto do conduto
\bar{u}	=	campo de velocidades [LT^{-1}]
\underline{u}	=	campo de velocidades médias [LT^{-1}]
u'	=	campo de flutuação de velocidades [LT^{-1}]
u_m	=	máximo valor da velocidade longitudinal em qualquer seção [LT^{-1}]
x	=	distância longitudinal a partir do bocal [L]
z_r	=	profundidade de referência [L]

Letras maiúsculas

A	=	área da abertura da comporta ou bocal [L^2]
A^*	=	área molhada [L^2]

<i>B</i>	=	largura da seção transversal do conduto [L]
<i>C_c</i>	=	coeficiente de contração
<i>C_d</i>	=	coeficiente de descarga
<i>C³p</i>	=	parâmetro de pressões flutuantes
<i>CP</i>	=	coeficiente de pressão
<i>C\bar{P}</i>	=	coeficiente de pressão média
<i>CP_{min}</i>	=	coeficiente de pressão mínimo
<i>CP_{0,1%}</i>	=	coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 99,9% das ocorrências
<i>CP_{1%}</i>	=	coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 99% das ocorrências
<i>CP_{99,9%}</i>	=	coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 0,1% das ocorrências
<i>CP_{99%}</i>	=	coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 1% das ocorrências
<i>CI</i>	=	coeficiente auxiliar para o cálculo do comprimento do ressalto
<i>Cs</i>	=	coeficiente auxiliar que relaciona Y_R , D e c'
<i>D</i>	=	altura da seção transversal do conduto [L]
<i>DTKE</i>	=	dissipação de energia cinética turbulenta [L^2T^{-3}]
<i>E_L</i>	=	energia específica na seção da altura conjugada lenta [L^2T^{-2}]
<i>E_R</i>	=	energia específica na seção da altura conjugada rápida [L^2T^{-2}]
ΔE	=	perda de energia específica no ressalto [L^2T^{-2}]
<i>Fb_i</i>	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão na base do conduto
<i>F_f</i>	=	força de atrito total no ressalto [MLT^{-2}]
<i>F_L</i>	=	Froude do escoamento a jusante do ressalto
<i>F_R</i>	=	número de Froude do regime supercrítico (em Y_R)
<i>Ft_i</i>	=	coeficientes da equação que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão no teto do conduto
<i>F_{vc}</i>	=	número de Froude na veia contraída
<i>H</i>	=	carga hidráulica [L]
ΔH	=	diferença de carga hidráulica [L]
<i>H_V</i>	=	carga hidráulica correspondente à pressão de vapor [L]
<i>H_m</i>	=	carga hidráulica de montante [L]
<i>L</i>	=	escala de comprimento
<i>L_R</i>	=	comprimento do rolo [L]
<i>L_j</i>	=	comprimento do ressalto [L]
<i>L_{adm}</i>	=	coeficiente de posição
<i>L_i</i>	=	posição dos pontos de medição [L]
<i>P</i>	=	pressão absoluta em um ponto do corpo imerso [$ML^{-1}T^{-2}$]
\bar{P}	=	pressão média [$ML^{-1}T^{-2}$]
$\bar{P}_{a100\%}$	=	pressão média no ponto de medição 100% de abertura da comporta [$ML^{-1}T^{-2}$]
<i>P₁</i>	=	forças externas à região do rolo, seção 1 [MLT^{-2}]
<i>P₂</i>	=	forças externas à região do rolo, seção 2 [MLT^{-2}]
<i>P₃</i>	=	força correspondente ao peso do rolo [MLT^{-2}]
<i>P₀</i>	=	pressão absoluta no ponto de referência [$ML^{-1}T^{-2}$]
<i>P_V</i>	=	tensão de vapor [$ML^{-1}T^{-2}$]
<i>P_{0,1%}</i>	=	pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99,9% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [$ML^{-1}T^{-2}$]
<i>P_{1%}</i>	=	pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [$ML^{-1}T^{-2}$]
<i>P_{99,9%}</i>	=	pressão no ponto de medição igualada ou superada em 0,1% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [$ML^{-1}T^{-2}$]
<i>P_{99%}</i>	=	pressão no ponto de medição igualada ou superada em 1% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [$ML^{-1}T^{-2}$]
ΣP	=	soma das forças externas [$ML^{-1}T^{-2}$]

P^*	=	perímetro molhado [L]
Q	=	vazão [L^3T^{-1}]
Q_a	=	Vazão de ar [L^3T^{-1}]
Q_w	=	vazão de água [L^3T^{-1}]
Re	=	número de Reynolds
S	=	grau de submergência
SD	=	flutuação de pressão (desvio padrão) [L]
TKE	=	energia cinética turbulenta [L^2T^{-2}]
U_0	=	velocidade na seção da altura conjugada rápida [LT^{-1}]
U_2	=	velocidade do escoamento secundário [LT^{-1}]
V	=	velocidade média do escoamento [LT^{-1}]
V_a	=	velocidade média na seção da comporta [LT^{-1}]
V_D	=	velocidade média no conduto [LT^{-1}]
V_r	=	velocidade de referência [LT^{-1}]
V_0	=	velocidade de referência [LT^{-1}]
V_1	=	velocidade média do escoamento a montante do ressalto [LT^{-1}]
V_2	=	velocidade média do escoamento na seção plena [LT^{-1}]
V_m	=	velocidade do escoamento de montante [LT^{-1}]
Y_L	=	lâmina do escoamento subcrítico, ou altura conjugada lenta [L]
Y_L^*	=	altura conjugada lenta equivalente [L]
Y_R	=	lâmina do escoamento supercrítico, ou altura conjugada rápida [L]
Y_T	=	altura de água na seção de regime subcrítico [L]
Y_{vc}	=	lâmina de água na seção da veia contraída [L]

Letras gregas

ϖ	=	coeficiente de concentração de ar
α	=	coeficiente de energia cinética
α_1	=	coeficiente da velocidade
α_2	=	coeficiente da velocidade
β	=	coeficiente de aeração
β_3	=	ângulo que o terminal da comporta forma com a base do conduto
δ	=	espessura nominal da camada limite [L]
δ_w	=	abaixamento do nível de água imediatamente a jusante da comporta [L]
λ_V	=	escala das velocidades
λ_a	=	escala de acelerações
λ_L	=	escala geométrica
λ_ν	=	escala de viscosidades
γ	=	peso específico da água [$ML^{-1}T^{-1}$]
ν	=	viscosidade cinemática [L^2T^{-1}]
θ	=	ângulo entre o fundo do conduto e a horizontal
ρ	=	massa específica [ML^{-3}]
σ_i	=	coeficiente, ou índice, de cavitação incipiente
σ	=	coeficiente, ou índice, de cavitação

Capítulo I

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O Brasil dispõe de um privilegiado potencial hídrico, com rios caudalosos e de longas extensões. Devido às características do relevo, no Brasil predominam os rios de planalto, encachoeirados e com significativos desníveis entre a nascente e a foz, a exemplo dos rios Paraná e São Francisco.

Os rios de planalto apresentam obstáculos à navegação, no entanto, suas quedas de água possuem interessante potencial para a geração de energia elétrica. Nesse caso, a construção dos reservatórios das usinas hidrelétricas favorece as condições de navegabilidade dos rios, tanto pela regularização de suas vazões, como pelo aumento das dimensões do seu leito e pela superação das barreiras naturais. No entanto, a barragem da usina passa a ser o obstáculo a ser vencido pelas embarcações.

De acordo com Brasil (2010), o Brasil possui 63 mil quilômetros de rios e lagos/lagoas, sendo cerca de 40 mil quilômetros potencialmente navegáveis. Segundo Brasil (2013a), em 2012 a extensão de vias interiores economicamente navegadas era de 20.956 km, conforme apresentado na Tabela 1.1. Minério de ferro e soja são os produtos mais transportados na navegação de interior brasileira (BRASIL, 2012a).

Tabela 1.1 - Vias brasileiras economicamente navegadas.

Hidrovias Economicamente Navegadas	Quilometragem	%
Paraguai	592	3
Paraná-Tietê	1.495	7
São Francisco	576	3
Solimões-Amazonas	16.797	80
Sul	514	2
Tocantins	982	5
Total	20.956	100

Fonte: BRASIL, 2013a.

Ainda de acordo com a Tabela 1.1, 80% da extensão de vias brasileiras economicamente navegadas em 2012 estavam na região Amazônica, que possui rios de planície naturalmente navegáveis. Essa região é a nova fronteira de expansão da geração de energia hidrelétrica e caberá às autoridades brasileiras a superação tempestiva dos desafios institucionais, jurídicos e econômicos que envolvem a conciliação entre a navegação já existente e a construção de hidrelétricas.

No campo da engenharia, a conciliação entre a navegação e a construção de hidrelétricas é viabilizada pela transposição de desnível pelas embarcações, por meio de soluções por sistemas hidráulicos, como eclusas e canais artificiais, ou por sistemas mecânicos, como os ascensores ou mesmo o transporte a seco.

Os sistemas hidráulicos, do tipo eclusas de navegação, podem ser de (BRASIL, 2012b):

- a) Câmara única (eclusas simples);
- b) Câmaras múltiplas, em que a porta de jusante da câmara de montante coincide com a porta de montante da câmara de jusante e o enchimento da câmara inferior é feito com o esgotamento da câmara superior;
- c) Escadas de eclusas, formadas por uma série de câmaras simples ligadas por canais de navegação intermediários;
- d) Eclusas geminadas, constituídas de duas câmaras em paralelo, ligadas por um circuito hidráulico que permite o enchimento de uma a partir do esvaziamento da outra.

Os sistemas mecânicos podem ser (BRASIL, 2012b):

- a) Elevadores verticais, em que as embarcações vencem o desnível, normalmente, flutuando dentro de câmaras, munidas de portas, deslocadas verticalmente;
- b) Planos inclinados, o desnível é vencido pelas embarcações, normalmente, flutuando dentro de câmaras, munidas de portas, que são deslocadas sobre trilhos;
- c) Rampa hidráulica, as embarcações vencem o desnível flutuando em uma cunha de água suportada por uma placa vertical, deslocada em uma rampa;

- d) Outros tipos. As embarcações pequenas podem ser transportadas entre os níveis de água de montante e de jusante, a seco, em carretas tracionadas em rampas por cabos ou algum tipo de veículo, ou flutuando, rebocadas por uma embarcação provida de motores potentes ou tracionadas por cabo com extremidade fixa. Este último sistema só pode ser aplicado se não houver barramento completo do rio, por exemplo: durante a fase de construção de uma barragem.

No Brasil destacam-se 14 eclusas em operação, conforme a Tabela 1.2, nas hidrovias Paraná-Tietê, São Francisco, Sul e Tocantins.

Tabela 1.2 - Principais eclusas em operação no Brasil.

Região	Estado	Hidrovia	Eclusa	Tipo
Norte	PA	Tocantins	Tucuruí	Escada de eclusas
Sul	RS	Sul (Taquari-Jacuí)	Amarópolis	Câmara única
			Anel de Dom Marco	Câmara única
			Bom Retiro	Câmara única
			Fandango	Câmara única
Nordeste	BA	São Francisco	Sobradinho	Câmara única
Sudeste	SP	Paraná-Tietê	Barra Bonita	Câmara única
			Bariri	Câmara única
			Ibitinga	Câmara única
			Promissão	Câmara única
			Nova Avandava	Escada de eclusas
			Três Irmãos	Escada de eclusas
			Jupia	Câmara única
			Porto Primavera	Câmara única

Fonte: BRASIL, 2013b.

O Ministério dos Transportes publicou, em dezembro de 2010, o documento intitulado Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário, que é um avanço no trabalho iniciado com o Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLT de 2007, que apresenta como meta, para um horizonte de 20 anos, o aumento de 13% para 29% da participação do transporte aquaviário de carga na matriz nacional. O referido documento estabeleceu um portfólio composto por 62 eclusas a serem implantadas até o ano de 2026,

das quais 27 eclusas foram elencadas como prioridade, equivalendo a um investimento estimado em R\$ 11,6 bilhões.

As eclusas, principalmente as de alta queda, são acompanhadas de diversos fenômenos hidráulicos nocivos que devem ser estudados, de forma a identificar suas características, os problemas associados e as soluções possíveis para evitar que ocorram danos às obras hidráulicas. A Figura 1.1 apresenta esquematicamente o perfil de uma eclusa de navegação de câmara simples.

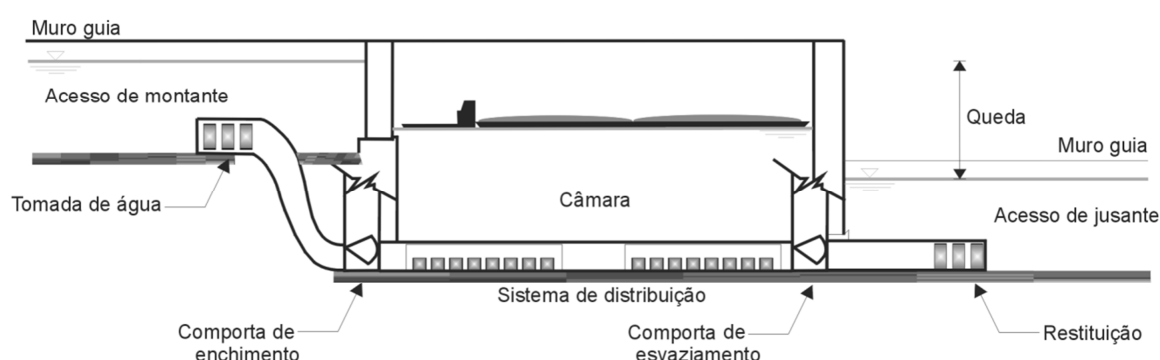


Figura 1.1 - Perfil de uma eclusa de navegação de câmara simples.

(Fonte: Adaptado de USACE, 2006).

O escoamento a jusante das comportas de controle de fluxo dos sistemas de enchimento e esvaziamento (Figura 1.2) é altamente turbulento. A formação de um jato ocasiona a redução de pressão nessa zona e, em consequência disso, pontos do líquido podem atingir a pressão de vapor, desencadeando o processo de cavitação. Quando transportadas pelo escoamento para regiões de pressões mais elevadas, as cavidades de vapor colapsam, gerando frequências e pressões capazes de produzir vibrações indesejáveis e erosão nas paredes sólidas.

Para transpor grandes desníveis, estudos econômicos têm indicado como opção de menor custo a construção do menor número de eclusas, resultando na transposição individual de desníveis significativos. Esse fato contribui para o aumento gradativo das quedas de projeto das eclusas (PETRY; PALMIER, 1992). De acordo com Ussami (1980), a cavitação junto às comportas de eclusas de alta queda se constitui em uma das principais limitações para o aumento da altura de queda das eclusas.

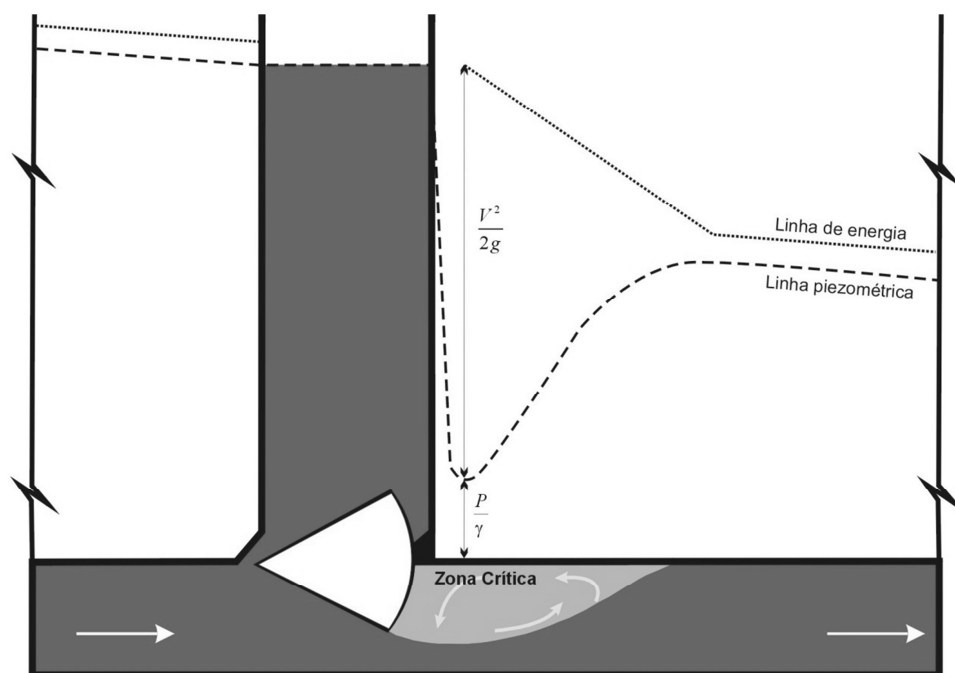


Figura 1.2 - Desenho esquemático do fluxo a jusante da comporta de controle de fluxo dos sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas.

(Fonte: Adaptado de USACE, 1975).

A motivação deste trabalho surgiu da necessidade de se aprofundar os conhecimentos sobre a dinâmica do escoamento junto às comportas dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de alta queda, de modo a subsidiar soluções técnicas que permitam a construção segura de eclusas de queda mais elevada que as atualmente viabilizadas. Isso resultaria em uma economia de recursos na implantação de sistemas de transposição de desníveis e contribuiria para a viabilização da execução das eclusas planejadas na Política Nacional de Transporte Hidroviário.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é analisar os parâmetros hidráulicos do escoamento médio a jusante de comportas dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas, do tipo segmento invertida, e as pressões instantâneas ao longo do teto e da base do conduto, de forma a identificar e caracterizar padrões de comportamento que auxiliem na elaboração de projetos e no aperfeiçoamento dessas estruturas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Podem ser listados os seguintes objetivos específicos aplicados ao estudo do escoamento a jusante de comportas dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas:

- Caracterizar a distribuição das pressões médias junto ao teto e à base do conduto;
- Avaliar a aplicabilidade do software de Dinâmica de Fluidos Computacional, *Flow 3D®*, na simulação do escoamento médio;
- Mapear e avaliar para o escoamento médio as linhas de corrente, os campos de pressão, de velocidade na direção x, de velocidade na direção z, de energia cinética turbulenta e de dissipação de energia cinética turbulenta;
- Identificar as áreas da estrutura submetidas às maiores solicitações;
- Caracterizar o comportamento das pressões instantâneas e de seus valores extremos junto ao teto e à base do conduto.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está organizada em seis capítulos.

Neste Capítulo I, de caráter introdutório, foi descrita a motivação do trabalho e foram apresentados os seus objetivos. Os Capítulos II e III, respectivamente, expõem a base bibliográfica e a metodologia aplicada para o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo IV é composto pela análise e discussão dos resultados. Nele está apresentada a caracterização do escoamento médio e do comportamento das pressões instantâneas ao longo do teto e da base do conduto.

O Capítulo V contém as conclusões do trabalho e o Capítulo VI as recomendações e sugestões para a continuidade da pesquisa e evolução sobre o tema.

Ao final, relacionam-se as referências bibliográficas e apresenta-se um apêndice do trabalho.

Capítulo II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO E SEUS SISTEMAS DE CONTROLE DE FLUXO

As eclusas de navegação são mecanismos que têm a função de promover, de forma segura, a transposição de desníveis gerados por barreiras pontuais, naturais (quedas de água e istmos) ou de ação antrópica (barramentos), pelas embarcações.

Na Figura 2.1 apresenta-se a implantação de uma eclusa para permitir a transposição do desnível gerado pela barragem da Usina Hidrelétrica Holt, localizada no Alabama, Estados Unidos da América.

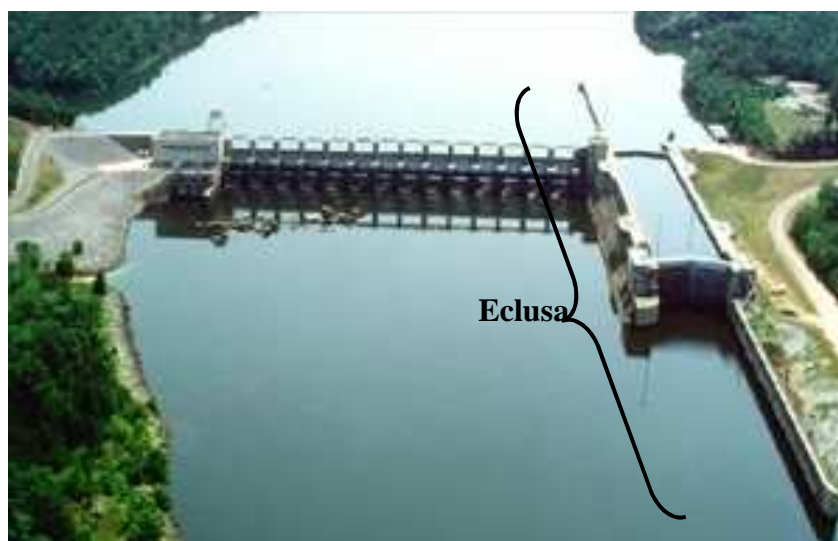


Figura 2.1 - Barragem e eclusa de navegação Holt.

(Fonte: < <http://www.industcards.com/jones-bluff.jpg>>. Acesso em: 22 ago. 2006).

Uma eclusa constitui-se de uma câmara dentro da qual é possível variar o nível de água segundo os níveis externos, seguindo o princípio de vasos comunicantes.

Os principais componentes de uma eclusa de navegação estão descritos na sequência e podem ser conferidos na Figura 2.2 (USACE, 2006):

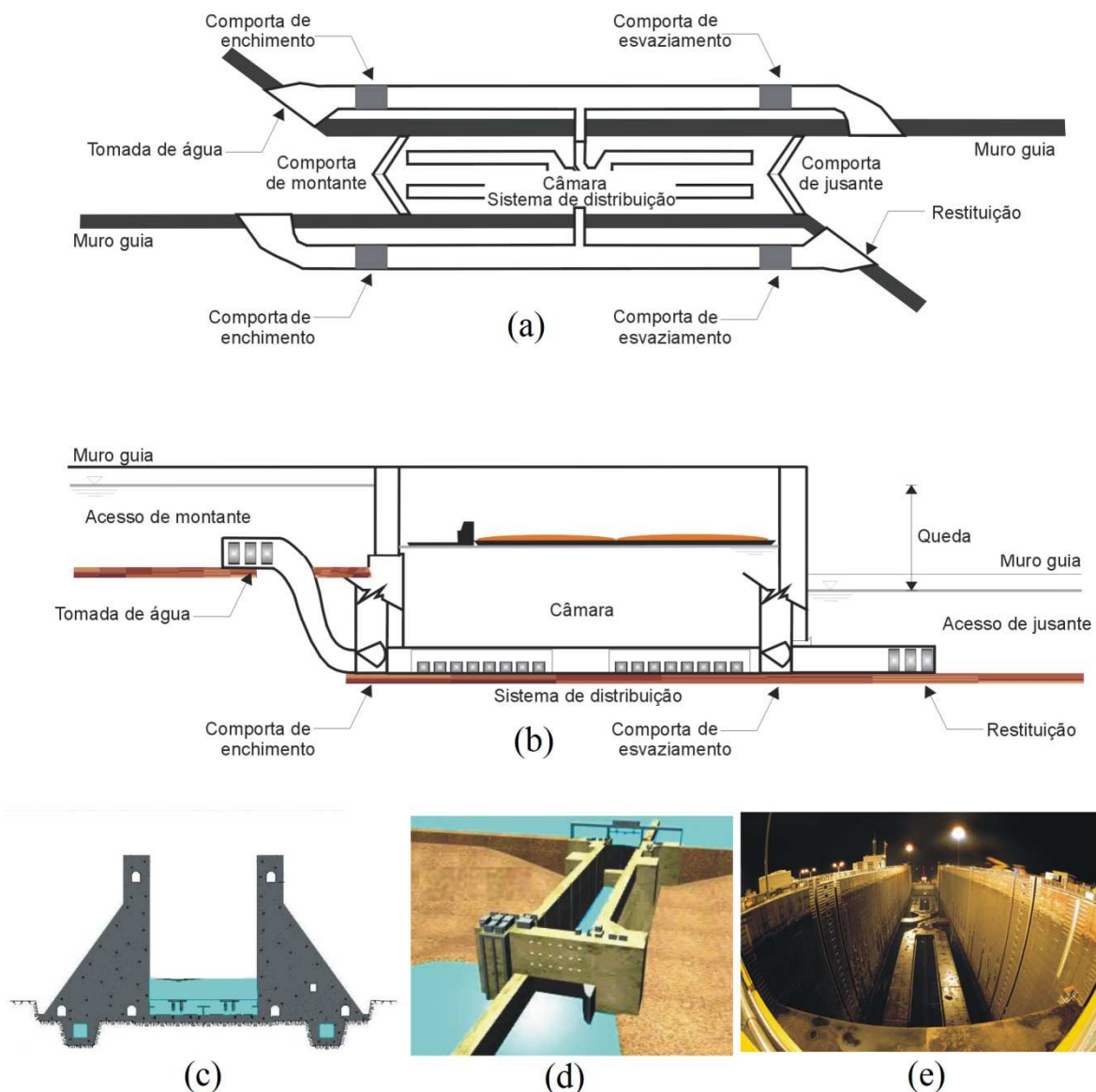


Figura 2.2 - Componentes das eclusas de navegação. (a) Planta. (b) Corte longitudinal. (c) Corte Transversal. (d) Modelo. (e) Foto de um sistema de enchimento.

(Fontes: (a) e (b) Adaptado de USACE, 2006; (c) e (d) <<http://www.ahimor.gov.br>>. Acesso em: 08 jun. 2007; (e) <<http://images.usace.army.mil/photolib.html>>. Acesso em: 05 set. 2006).

- a) **Acesso de montante**: constituído de um canal de aproximação e de muros guia que auxiliam as embarcações no acesso à câmara. Como o fluxo de água nas eclusas ocorre por gravidade, o termo montante é aplicado aos elementos do extremo de nível de água mais elevado;

- b) **Câmara:** constitui-se de um reservatório onde ocorre a variação de nível. Suas barreiras extremas são móveis, permitindo o acesso das embarcações ao seu interior (comportas de montante e jusante);
- c) **Sistema de distribuição:** conjunto de elementos hidráulicos que permite o fluxo de água para enchimento e esvaziamento da câmara. Pode-se citar o canal de adução, a tomada de água, os aquedutos, as comportas, o sistema de distribuição e o sistema de restituição. Para se elevar o nível de água na câmara, abrem-se as comportas de enchimento mantendo as de esvaziamento fechadas. Para o abaixamento do nível de água na câmara, abrem-se as comportas de esvaziamento mantendo as de enchimento fechadas;
- d) **Acesso de jusante:** de forma similar ao acesso de montante, o acesso de jusante se constitui de um canal de aproximação e de muros guia, porém o acesso de jusante encontra-se situado no extremo com nível de água mais baixo.

A magnitude do desnível a ser transposto (queda) é dada pela diferença entre os níveis de água de montante e jusante e permite a classificação das eclusas em (USACE, 1995):

- Eclusas de baixa queda: com desnível de até 10 m;
- Eclusas de média queda: com desnível entre 10 m e 15 m; e
- Eclusas de alta queda: com desnível superior a 15 m.

De acordo com Silva (2012), a primeira eclusa de câmara, semelhante às atuais, data de 1409 e foi construída em Hahnenburg, na Alemanha. Entretanto, a primeira eclusa que se conhece em detalhes foi construída na Itália, em 1439, no canal “Naviglo Grande”, que liga Milão ao rio Ticino. As eclusas do passado eram de baixa queda (2 a 6 m no máximo), sendo que a diferença de nível de dez metros foi vencida em um só lance em 1884, na eclusa La Villette no canal de Saint-Denis, em Paris.

A evolução dos desníveis alcançados pelas eclusas de navegação está diretamente relacionada à evolução dos sistemas de enchimento e esvaziamento das eclusas. De acordo com Canholi (1984), a finalidade da multiplicidade de sistemas de distribuição foi exigida tendo em vista as diferentes combinações de dimensões da

câmara, dos desníveis e dos tempos de operação exigidos, associados à prática existente à época da elaboração de cada projeto.

Os sistemas com enchimento e esvaziamento realizados pelas extremidades da câmara (cabeças da eclusa) podem ser simplificados, nos quais o enchimento se dá pela própria comporta de montante ou por válvulas instaladas nesta comporta, ou podem ser complexos, com sofisticadas bacias de dissipação de energia. Em função de critérios econômicos, operacionais e de *layout*, os sistemas simplificados, representados na Figura 2.3, são recomendados para quedas de até 4,5m; já os sistemas complexos, Figura 2.4, podem atingir 13m (PALMIER, 1990; SANTOS, 1998; e USACE, 2006).

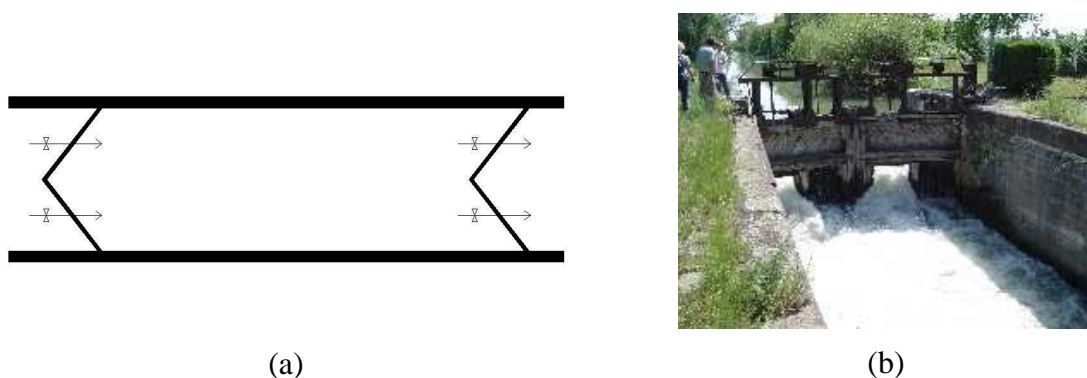


Figura 2.3 - Sistema simplificado - enchimento pelas portas. (a) Representação esquemática. (b) Imagem.

(Fontes: (a) Adaptado de PALMIER, 1990;
(b) <<http://lhommebricole.free.fr/2004/ECLUSEKUNHEIM.htm>>. Acesso em: 03 jul. 2012).

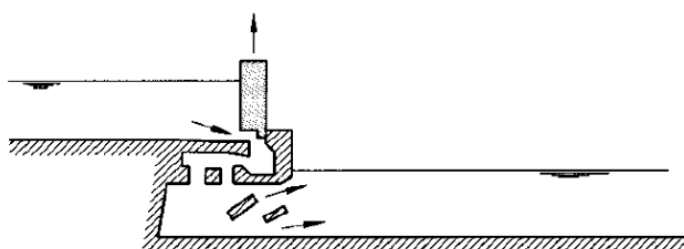


Figura 2.4 - Sistema complexo - enchimento frontal com dissipadores de energia.

(Fonte: GLERUM; VRIJBURCHT, 2000).

Os sistemas de enchimento e esvaziamento por meio dos muros laterais, conforme apresentado na Figura 2.5, são sistemas compostos de dois aquedutos longitudinais embutidos nos muros laterais que possuem comportas de controle de fluxo em suas extremidades e conexões com a câmara. Esses sistemas são recomendados para quedas de até 12m. O sistema mais simples possui orifícios distribuídos longitudinalmente com conexão direta entre o aqueduto e a câmara. A aplicação desse sistema tem limitações em função da estabilidade do plano de água dentro da câmara durante o enchimento, especialmente se apenas um aqueduto estiver em operação. Para casos em que a lâmina de água inicial supere 3 vezes o calado, o sistema pode ser empregado em eclusas com até 15m de queda. A evolução desse sistema possui derivações dos aquedutos para o interior da câmara. Essas derivações possuem orifícios responsáveis pela conexão com a câmara e os orifícios contrapostos se revelam eficientes na dissipação de energia. Utilizando esse sistema com derivações, a eclusa Holt, nos Estados Unidos, vence uma queda de 19,39 m (PALMIER, 1990; SANTOS, 1998; e USACE, 2006).

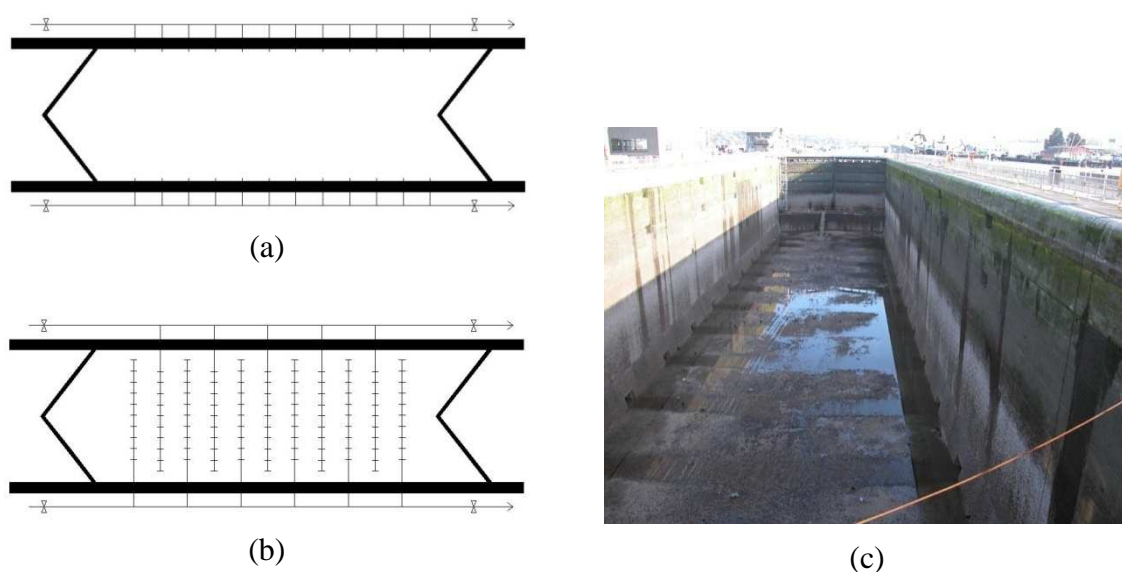


Figura 2.5 - Sistema de enchimento e esvaziamento pelos muros laterais. (a) Representação esquemática do sistema com orifícios distribuídos longitudinalmente com conexão direta entre o aqueduto e a câmara. (b) Representação esquemática do sistema com derivações dos aquedutos para o interior da câmara. (c) Imagem de (a).

(Fontes: (a) e (b) Adaptado de PALMIER, 1990;
(c) <<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Locks-2.jpg>>. Acesso em: 25 ago. 2006).

Os sistemas hidráulicamente balanceados possibilitam a distribuição da vazão afluyente à câmara de forma balanceada, de maneira a uniformizar o enchimento e o esvaziamento da mesma, visando à minimização os fenômenos de turbulência e ondulações, e ao favorecimento da realização de eclusagens mais rápidas e seguras. Para tanto, busca-se a obtenção de uma adequada proximidade para as perdas de carga e os termos de inércias dos diversos subcondutos que encaminham o fluxo para todo o interior da câmara (CANHOLI, 1984).

Nos Estados Unidos, procurou-se uma simplificação nos aquedutos de fundo, reduzindo suas seções e dotando-os de contornos hidráulicos mais refinados para conduzir o fluxo em alta velocidade. Esses sistemas são dotados de 4 ou 8 difusores simetricamente dispostos (Figura 2.6). À entrada da câmara, para as extremidades de montante e jusante, a bipartição do fluxo é realizada por meio de um septo horizontal. Para os difusores, a partição é feita por septos verticais. Defletores são dispostos no interior da câmara a fim de possibilitar a dissipação de energia, visto que as velocidades de saída de fluxo pelos orifícios são bastante elevadas (CANHOLI, 1984).

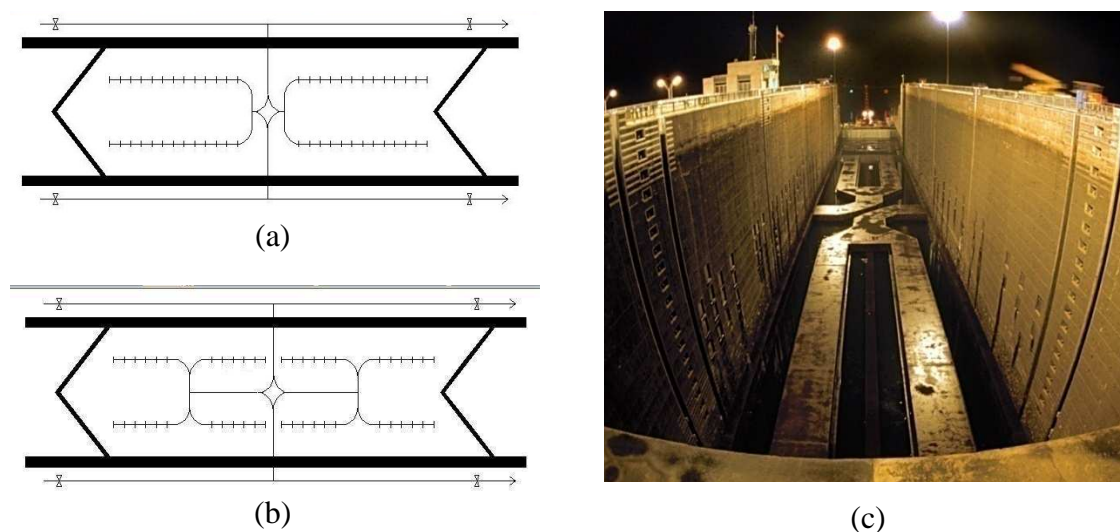


Figura 2.6 - Sistemas de enchimento e esvaziamento hidráulicamente balanceados.
 (a) Representação esquemática – sistema com 4 difusores. (b) Representação esquemática – sistema com 8 difusores. (c) Imagem – sistema com 4 difusores.

(Fontes: (a) e (b) Adaptados de USACE, 2006;
 (c) <<http://images.usace.army.mil/photolib.html>>. Acesso em: 05 set. 2006).

Os sistemas hidráulicamente balanceados são recomendados por USACE (2006) para quedas de até 30m. Contudo, esse tipo de sistema tem sido aplicado em eclusas de queda mais elevada, como nos casos brasileiros das eclusas de Tucuruí, com 35m, e no projeto da eclusa de Lajeado, com 38m.

Devido aos aspectos hidráulicos, especialmente a cavitação, 40m é o valor considerado como limite para a queda de uma eclusa de câmara simples (PIANC, 2009). Porém, com o desenvolvimento do sistema para redução do consumo de água por eclusagem (*Water Saving Basins - WSBs*), a ampliação da queda das eclusas também foi beneficiada.

Com o *WSBs* a água utilizada em uma eclusagem na câmara principal é aplicada em outra pela armazenagem da água em reservatórios paralelos de nível diferenciado, conforme a Figura 2.7.

A escolha do sistema de distribuição de água no interior da câmara deve ser feita considerando-se a diferença de níveis entre dois reservatórios. Assim, um sistema hidráulicamente balanceado geralmente é necessário. Para as câmaras simples, a cavitação junto às comportas de enchimento e esvaziamento limita a diferença de nível entre os reservatórios, mas não o número de reservatórios e, portanto, também não limita a queda total da câmara principal (WEBB, 2009).

Se a aplicação dos sistemas com *WSBs* for economicamente viável, os principais pontos de otimização do projeto são (PIANC, 2009):

- Número, área e diferença de nível entre os reservatórios;
- Sistema hidráulico e leis de operação das válvulas para a redução do tempo de eclusagem;
- Manutenção e redução do impacto em caso de problemas; e
- Número de condutos entre os reservatórios e a câmara.

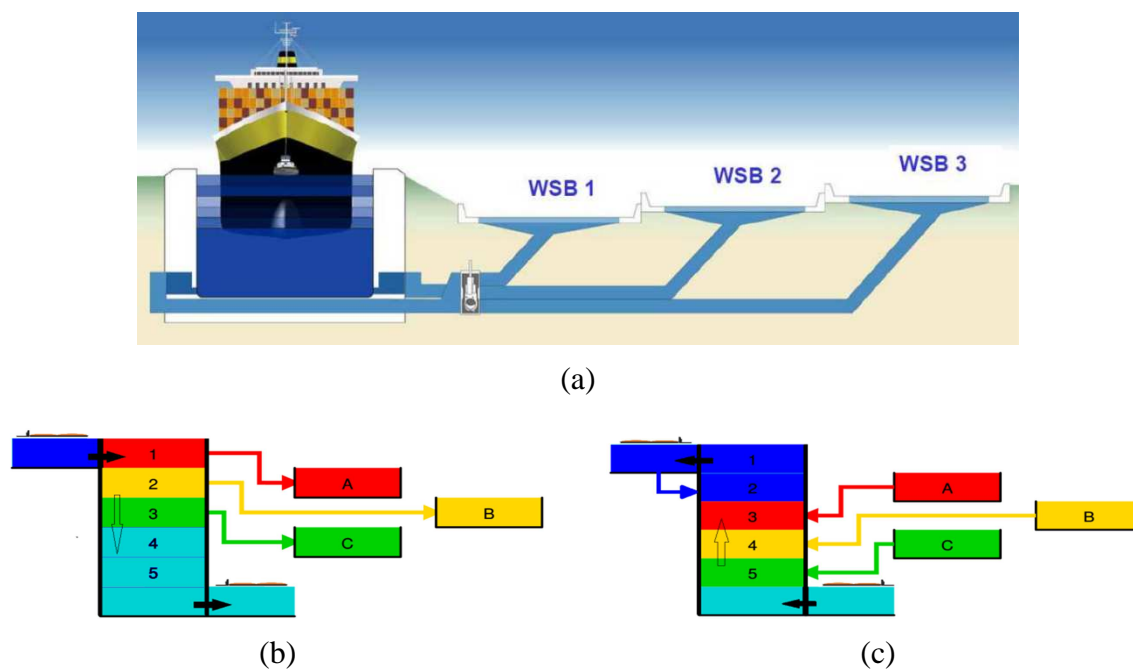


Figura 2.7 - Sistema para redução do consumo de água por eclusagem (*Water Saving Basins – WSBs*).

(Fontes: (a) <http://www.pianc.fi/AGA_technical_seminar/Rigo_WG29_Lock_innovations.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2013; (b) e (c) <http://en.wikipedia.org/wiki/Lock_water_transport>. Acesso em: 05 abr. 2013).

2.1.1 PROBLEMAS HIDRÁULICOS RELACIONADOS À QUEDA

O número de eclusas de alta queda vem aumentando junto com a construção de altos barramentos. Dois problemas chave são encontrados no projeto dessas eclusas (QINQIN, 2005):

- O primeiro está relacionado às condições de amarração das embarcações na câmara da eclusa. A fim de satisfazer os critérios de amarração das embarcações, a movimentação da superfície de água na câmara da eclusa deve ser uniforme, exigindo, para tanto, o uso de sistemas hidráulicamente balanceados; e
- O segundo se refere aos problemas hidráulicos encontrados junto às comportas de enchimento e esvaziamento. O diferencial de pressão entre as faces das comportas e o curto período exigido para as operações de eclusagem incorrem em condições hidráulicas as quais produzem não

somente cavitação, mas exigem um cuidado especial no projeto estrutural das comportas.

Com relação às comportas de controle de fluxo, as questões fundamentais podem ser resumidas em:

- Vibrações em função das flutuações de pressão a jusante das comportas;
- Esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação;
- Esforços ligados aos fenômenos de *downpull* e *uplift*, fenômenos que se referem ao empuxo descendente e ascendente, respectivamente; e
- Cavitação,

sendo a cavitação a mais importante das questões listadas, pois sua ação é altamente agressiva às estruturas (SANTOS, 1998).

A situação operacional que apresenta as maiores complicações hidráulicas é a do início do enchimento, quando a lâmina de água dentro da câmara é a menos favorável e verificam-se as maiores perturbações do plano de água, as maiores acelerações, as maiores instabilidades no escoamento nos aquedutos e os maiores riscos de ocorrência de cavitação (USSAMI, 1980).

2.1.2 COMPORTAS DE CONTROLE DE VAZÃO EM ECLUSAS

Vários tipos de comportas foram utilizados em eclusas, sendo que até 1950, nas eclusas de alta queda, predominava a aplicação de comportas planas de operação na vertical, conforme Figura 2.8 (USACE, 1975 e SANTOS, 1998).

De acordo com USACE (2011), as comportas planas de operação vertical apresentam vantagens em relação a outros tipos de comporta, como o menor custo, o menor tamanho de recesso para a sua instalação e a possibilidade de realização de manutenções sem a necessidade de interrupção no funcionamento do aqueduto. Os maiores problemas desse tipo de comporta estão relacionados à vibração, especialmente dependente do formato do terminal da comporta. As comportas planas de operação vertical exigem a execução de ranhuras nas paredes do aqueduto e essa descontinuidade pode causar cavitação,

principalmente em eclusas de alta queda. Além disso, os sistemas mecânicos de elevação podem exigir manutenção mais frequente do que os elementos de outros tipos de comporta.

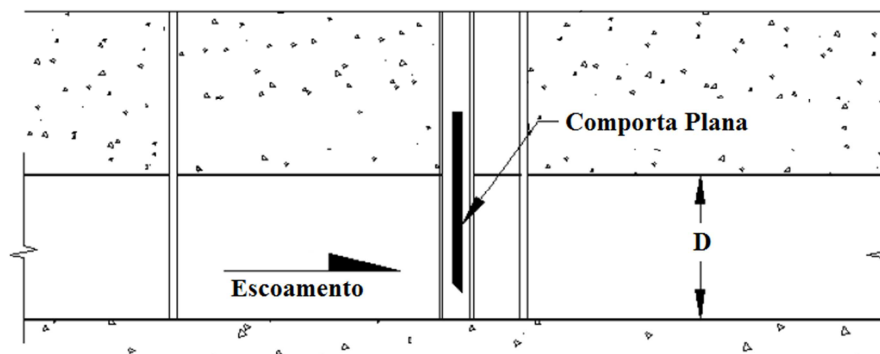


Figura 2.8 - Desenho esquemático da instalação de uma comporta plana no aqueduto de uma eclusa.

(Fonte: Adaptado de USACE, 2011).

A partir de 1930, devido ao grande sucesso técnico e econômico que estava sendo obtido com a aplicação em descarregadores de superfície, as comportas segmento (*Tainter gates*) passaram a ser aplicadas nos sistemas de enchimento e esvaziamento das eclusas (USACE, 1975 e SANTOS, 1998).

A comporta segmento (Figura 2.9) é dotada de uma chapa de paramento curva, correspondente a um segmento de cilindro com diretriz circular, e apresenta braços radiais que transferem a pressão hidráulica para mancais fixos (ERBISTE, 1987).

A posição regular da comporta segmento é aquela que possui seus braços solicitados à compressão e assim esse tipo de comporta foi implantado inicialmente em diversas eclusas de baixa queda, como nas eclusas do Welland Ship Canal, em 1933, no Canadá (USACE, 1975; USSAMI, 1980; e ERBISTE, 1987).

Com o aumento da queda das eclusas, ocorria a entrada de ar sem controle nos aquedutos pelo poço, ou recesso, da comporta na fase acelerada do escoamento. Essa entrada de ar poderia limitar a vazão líquida, caso ocorresse em grande quantidade, e causar grande turbulência e perturbações no plano de água interno à câmara, quando o ar fosse ali expelido, causando riscos à segurança das embarcações. Isso foi verificado nos estudos em modelo físico da eclusa Pickwick-Tennessee, a qual teria 20 m de queda. A

comporta segmento passou, então, a ser implantada na posição invertida, com braços solicitados à tração, como apresentado na Figura 2.10. Essa solução foi bem sucedida, evitando completamente a entrada de ar no escoamento pelo poço da comporta (USACE, 1975 e SANTOS, 1998).

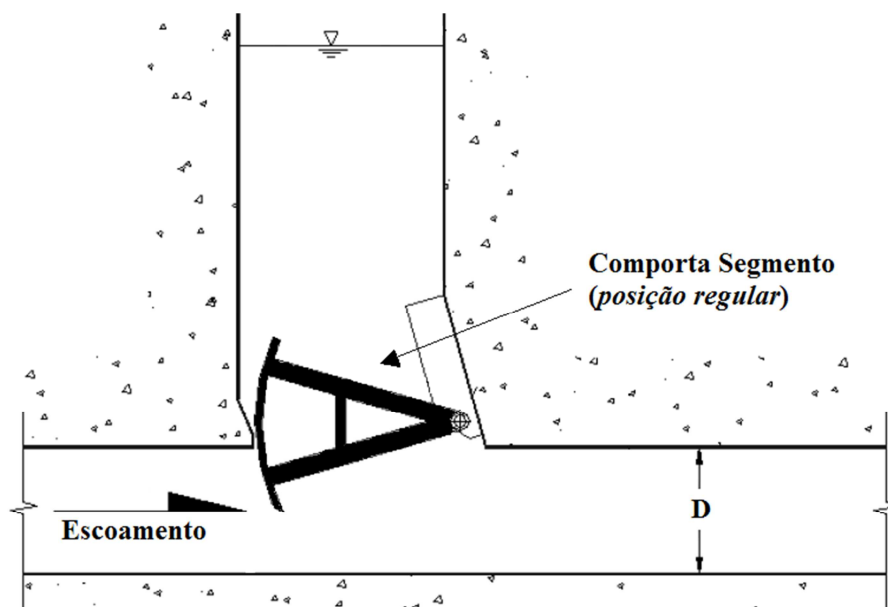


Figura 2.9 - Desenho esquemático da instalação de uma comporta segmento, em sua posição regular, no aqueduto de uma eclusa.
(Fonte: Adaptado de USACE, 2011).

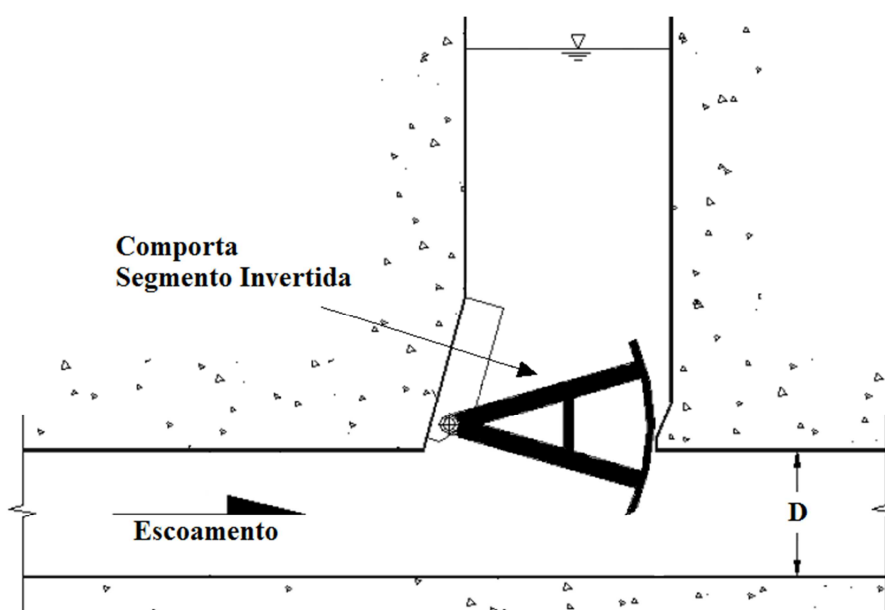


Figura 2.10 - Desenho esquemático da instalação de uma comporta segmento invertida no aqueduto de uma eclusa.
(Fonte: Adaptado de USACE, 2011).

Se testes demonstrarem que a introdução de ar no aqueduto não se converter em um problema, as comportas segmento na posição regular podem ser aplicadas.

USACE (2011) destaca as seguintes vantagens da comporta segmento na posição regular em relação à mesma comporta na posição invertida:

- Uma vez que a força hidrostática sobre a comporta atua radialmente, as forças verticais que atuam no mecanismo de elevação são apenas as resultantes do peso seco da válvula e do atrito do movimento;
- A estrutura de fixação do munhão é mais simples;
- Para as mesmas condições de operação, a contração do jato a jusante da comporta é menor;
- O potencial de cavitação é menor; e
- As perdas de carga são menores.

A comporta segmento em sua posição invertida é a comporta mais usualmente aplicada nos aquedutos das eclusas, sendo que, por exemplo, desde 1940, segundo USACE (2011), apenas em três casos nos Estados Unidos não foi assim utilizada. Atualmente não se concebe outra solução que possa ter melhor desempenho técnico-econômico para as eclusas de alta queda do que a comporta segmento invertida (SANTOS, 1998).

São utilizados três tipos diferentes de estrutura para a comporta segmento invertiva: a estruturada horizontalmente, a de duas chapas de paramento e a estruturada verticalmente, conforme a Figura 2.11. Os três tipos podem ser construídos de forma suficientemente rígida, mas o verticalmente estruturado e o de duas chapas de paramento são menos suscetíveis a cargas hidráulicas críticas e a variações de carga durante o ciclo de abertura (USACE, 2006).

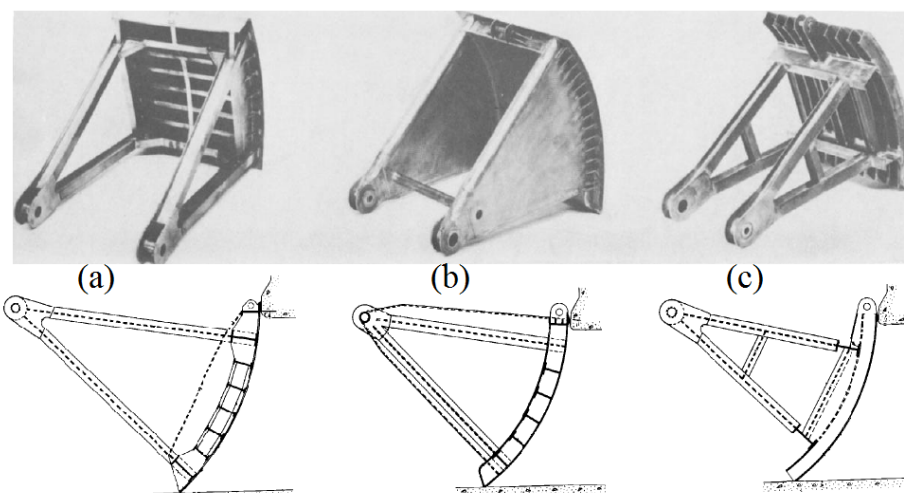


Figura 2.11 - Tipos básicos de comporta segmento invertida utilizados em aquedutos de eclusas de navegação. (a) Estruturada horizontalmente. (b) De duas chapas de paramento. (c) Estruturada verticalmente.

(Fonte: Adaptado de USACE, 1975).

2.2 ESCOAMENTO SOB COMPORTAS

2.2.1 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS FUNDAMENTAIS

O escoamento sob comportas é similar ao originado de orifícios. Neste caso, o jato que sai do orifício sofre uma contração gradual, ficando a sua seção menor do que a da abertura, pois, pela inércia das partículas, não pode ser brusca a mudança da direção do seu movimento e, assim, a seção útil do escoamento é menor (NEVES, 1989).

O grau de contração do escoamento a jusante de uma comporta pode ser representado pelo coeficiente de contração (C_c), definido como a razão entre a lâmina de água na seção da veia contraída (Y_{vc}) e a abertura da comporta (a), conforme a Equação 2.1 e Figura 2.12 (LIN *et al.*, 2002).

$$C_c = \frac{Y_{vc}}{a}, \quad 2.1$$

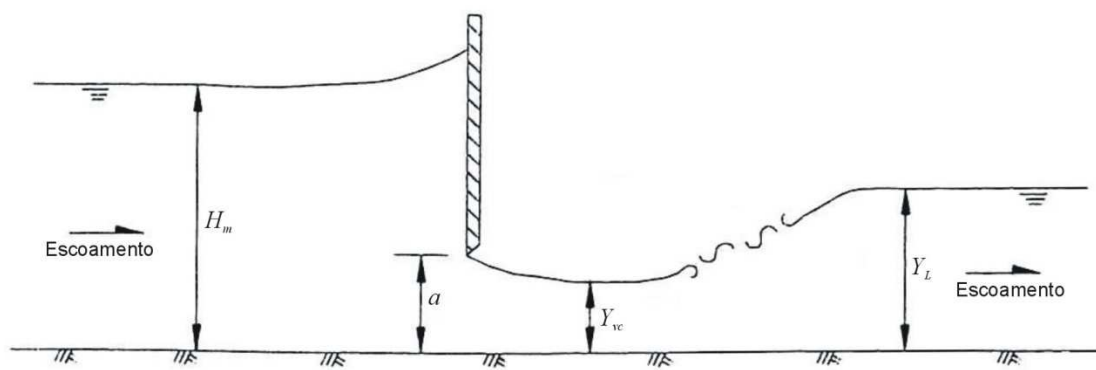


Figura 2.12 - Escoamento sob comportas.

(Fonte: Adaptado de LIN *et al.*, 2002).

Do balanço de energia, verifica-se que a descarga de uma comporta pode ser obtida da Equação 2.2 (CHOW, 1985).

$$Q = C_d A \sqrt{2g \left(H_m + \alpha \frac{V_m^2}{2g} \right)}, \quad 2.2$$

na qual:

Q = vazão sob a comporta;

C_d = coeficiente de descarga, introduzido para considerar as perdas de carga e corrigir a hipótese adotada de que os vetores velocidades são perpendiculares à seção do orifício (ARAUZ, 2005);

A = área da abertura da comporta;

g = aceleração devida à gravidade;

H_m = carga hidráulica de montante;

α = coeficiente de energia cinética;

V_m = velocidade do escoamento de montante.

Normalmente, os estudos experimentais omitem o termo de energia cinética, reduzindo a Equação 2.2 à forma da Equação 2.3, sendo os efeitos da energia cinética incluídos no coeficiente de descarga (CHOW, 1985).

$$Q = C_d A \sqrt{2gH_m}. \quad 2.3$$

A pressão na seção contraída do escoamento é a propriedade mais difícil de ser medida, e varia com a abertura da comporta (NEILSON, 1975 *apud* USACE, 2011). Também para a comporta segmento invertida, o coeficiente de contração (C_c) do escoamento varia em função do formato do terminal da comporta e do ângulo que ele forma com a base do conduto (β_3), que varia de acordo com a abertura da comporta. Ainda não foi formulada uma descrição universal para o C_c para as comportas segmento invertidas, mas os valores para algumas estruturas podem ser visualizados na Figura 2.13 (USACE, 2011).

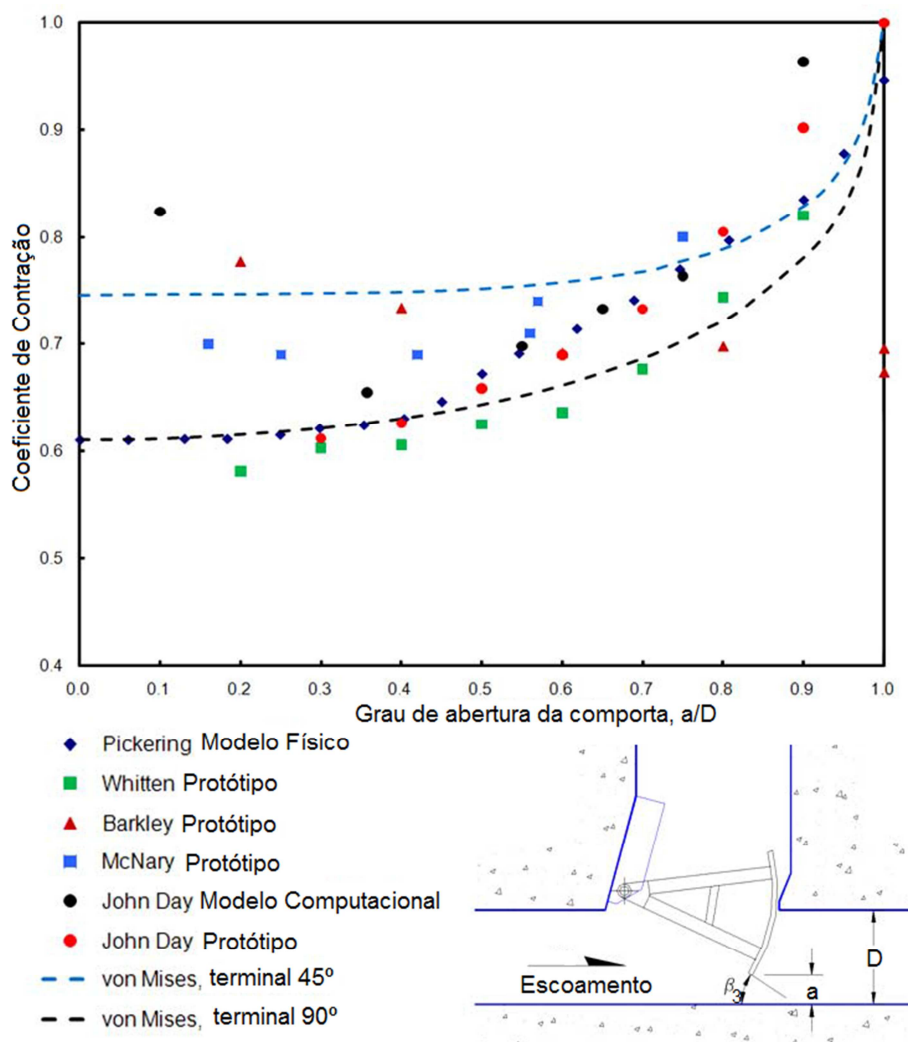


Figura 2.13 - Coeficiente de contração (C_c) para comportas segmento invertidas.

(Fonte: Adaptado de USACE, 2011).

A perda de carga singular em uma comporta pode ser obtida da Equação 2.4 (IDELCHIK, 1996):

$$h_l = k \frac{V^2}{2g}, \quad 2.4$$

na qual:

- h_l = perda de carga singular;
- k = coeficiente de perda de carga singular;
- g = aceleração devida à gravidade; e
- V = velocidade média do escoamento.

USACE (1977) apresenta o comportamento do coeficiente de perda de carga localizada para comportas segmento invertidas, em função da relação entre ao percentual de abertura da comporta, como pode ser verificado na Figura 2.14.

Segundo Cuomo *et al.* (1982), o coeficiente de perda de carga pode ser determinado teoricamente por meio da equação de Borda combinada com a condição de continuidade, Equação 2.5:

$$k = \left[\frac{1 - C_c \cdot (a/D)}{C_c \cdot (a/D)} \right]^2, \quad 2.5$$

na qual:

- C_c = coeficiente de contração; e
- a/D = grau de abertura da comporta.

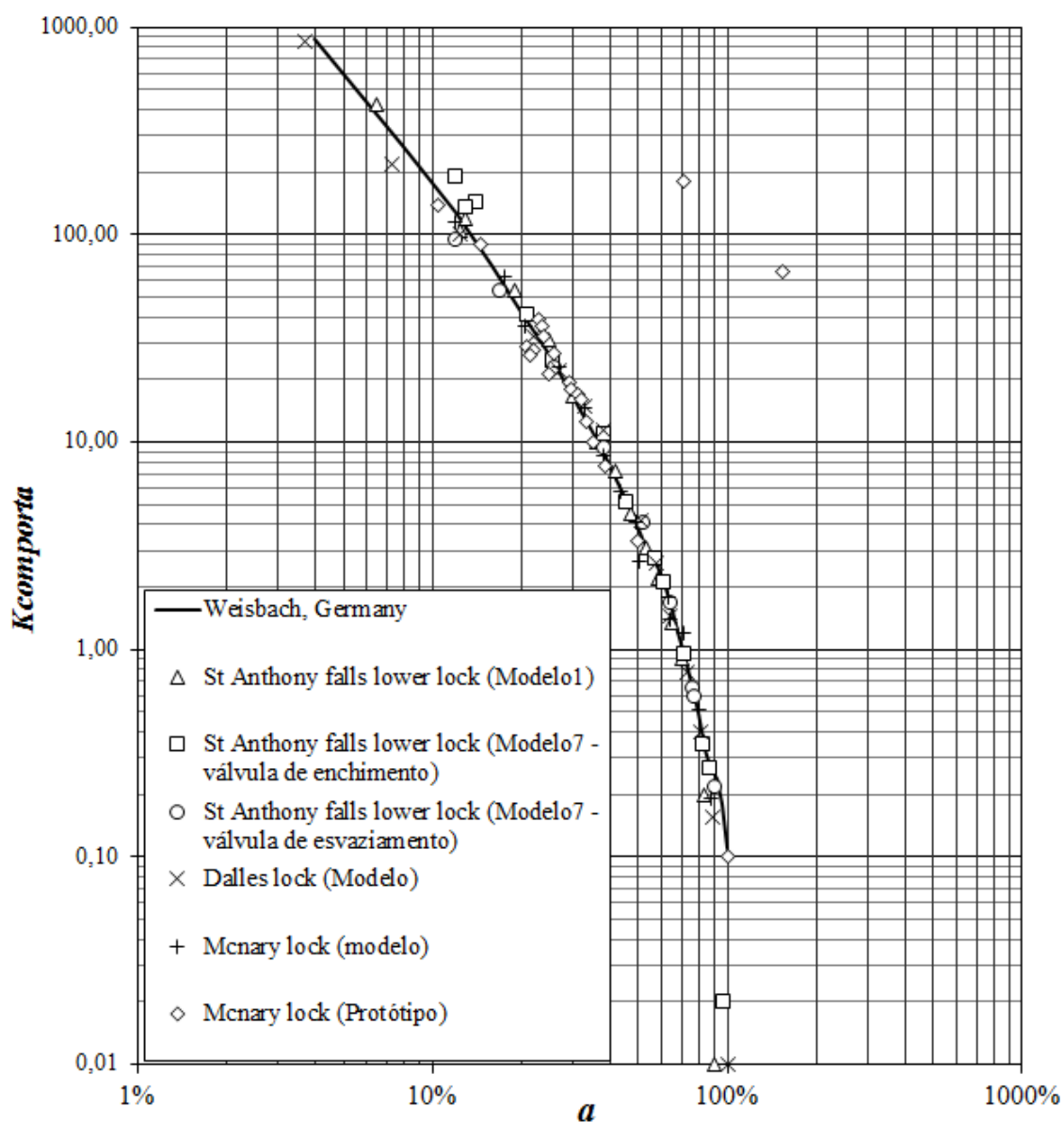


Figura 2.14 - Coeficiente de perda de carga localizada para comportas segmento invertidas.
(Fonte: Adaptado de USACE, 1977).

2.2.2 ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS E VIBRAÇÃO

Quando uma comporta está totalmente fechada e o líquido por ela totalmente represado, em repouso, as pressões obedecem às leis hidrostáticas. Com a comporta parcialmente aberta, o equilíbrio hidrostático é rompido e se observa uma distribuição não uniforme da carga piezométrica no conduto, junto à comporta (ERBISTE, 1987).

Essa distribuição de pressão é afetada por diversos fatores, incluindo o tipo do escoamento, as características geométricas das comportas e dos poços, as características geométricas do canal ou conduto, as perdas de carga a montante e a jusante das comportas, as condições de aeração e as propriedades do fluido (NAUDASCHER *et al.*, 1964).

A primeira abertura da comporta deve ser rápida e parcial, abertura de *cracking*, e mantida até a equalização entre as pressões de montante e jusante. Caso a comporta seja aberta sem a equalização das pressões, poderá haver uma força para cima que, em muitos casos, levanta indesejavelmente a comporta (*uplift*), provocando danos ao sistema de acionamento e em toda a estrutura de fechamento (OURIVES, 1989).

Os esforços hidrodinâmicos de abaixamento (*downpull*) e de levantamento (*uplift*) podem ser definidos como a força resultante induzida pelo escoamento nas superfícies das comportas que atua na direção do fechamento ou da abertura, respectivamente (ERBISTE, 1987 e AYDIN *et al.*, 2006).

As forças de *downpull* são acentuadas nas faixas de menores aberturas, enquanto as de *uplift* ocorrem para as maiores aberturas (MURRA; SIMMONS, 1967 *apud* ROMAGNOLI, 2005).

As forças hidrodinâmicas na direção vertical durante a operação são mais estáveis na comporta segmento invertida do que na comporta segmento em sua posição regular. Isso porque a força resultante é descendente na posição invertida até a comporta estar praticamente aberta. Na configuração regular, a força vertical é para cima até que a válvula esteja quase aberta (USACE, 2011).

Para o caso das comportas segmento invertidas, Figura 2.15, estudos em modelos físicos apresentaram a existência de esforços de *downpull* de 0% a 75% de abertura e de *uplift* a partir dos 75% de abertura (USACE, 1975).

As características dinâmicas da comporta e das condições do fluxo ao seu redor podem, ainda, ser fonte de vibrações excessivas que provocam tanto deformações indesejadas quanto o comprometimento de sua estabilidade global. As vibrações induzidas em comportas hidráulicas são críticas em faixas de aberturas relativamente reduzidas (ROMAGNOLI, 2005).

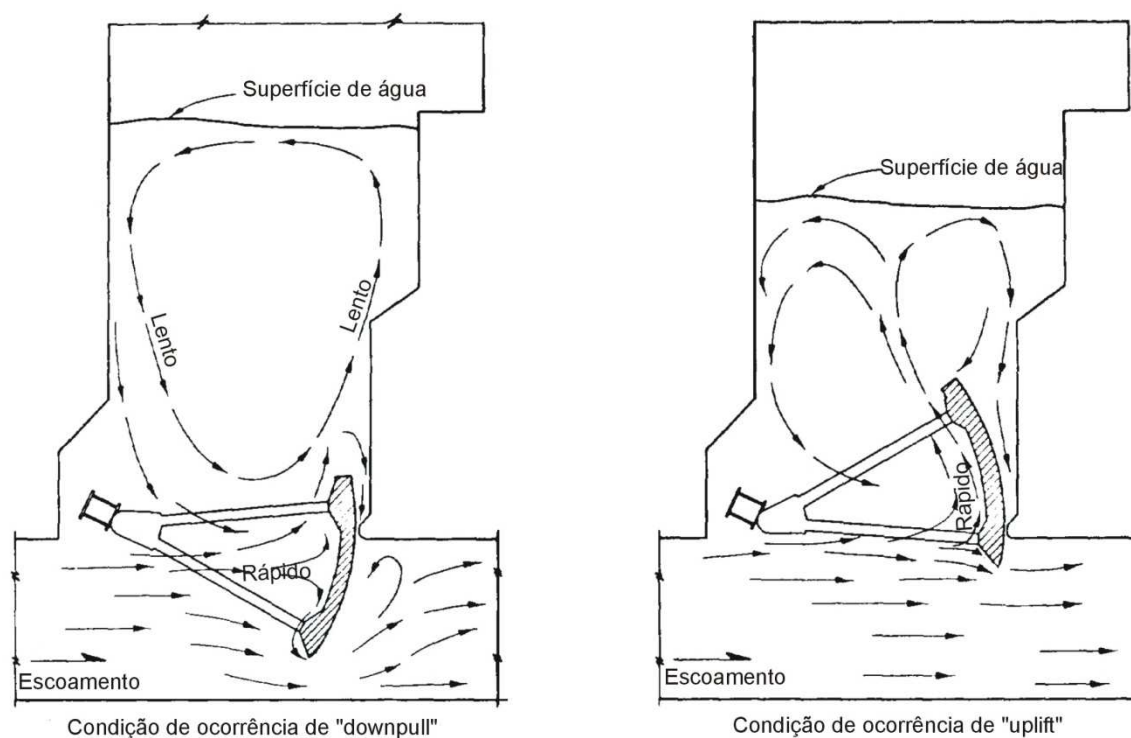


Figura 2.15 - Esforços de *downpull* e de *uplift* em comportas de eclusas.

(Fonte: USACE, 1975).

Os elementos básicos do estudo das vibrações induzidas por escoamentos são (ROMAGNOLI *et al.*, 2005):

- Corpos oscilantes: consistem em estruturas rígidas capazes de sofrer deformações quando solicitadas;
- Fluidos oscilantes: consistem de uma massa de fluido a qual pode sofrer oscilações usualmente governadas pela gravidade ou pela compressibilidade do fluido ; e
- Fontes de excitação, as quais podem ser:
 - a) Induzidas externas: causadas por flutuações das grandezas do escoamento, sem qualquer dependência da estrutura da comporta;
 - b) Induzidas pela instabilidade: devidas às condições de instabilidades do escoamento provocadas pela estrutura da comporta; e

- c) Induzidas pelo movimento: devidas ao movimento próprio da estrutura da comporta.

Kolkman (1970) *apud* USACE (2011) aponta que a grande rigidez radial da estrutura da comporta segmento impede a vibração na direção do fluxo principal, que as vibrações transversais são amortecidas pelas vedações e que o foco deve estar sobre as forças no sentido vertical.

A vibração nas comporta segmento invertidas em eclusas é resultado da interação entre as estruturas hidráulicas e o fluxo, e a cavitação é a causa principal de vibração violenta ou prejudicial. Medidas estruturais, terminal da comporta em ângulo agudo, alterações geométricas no aqueduto, aeração e aplicação de leis de manobra da comporta são aplicadas para reduzir e controlar vibração (LUO *et al.*, 2009).

2.2.3 ESCOAMENTO A JUSANTE DE COMPORTAS EM CONDUTOS

Chow (1985) apresenta os tipos de escoamento verificados a jusante de uma comporta. Para diversas aberturas da comporta verificam-se escoamentos com lâmina inferior à crítica e, assim, um escoamento supercrítico sob a mesma. O comportamento do escoamento subsequente dependerá do controle de jusante, conformação geométrica da estrutura ou do tipo de escoamento.

Remetendo-se ao caso de interesse deste trabalho, Sharma (1976) classifica em seis tipos o escoamento a jusante de comportas em condutos horizontais, para o caso de comporta parcialmente aberta (Figura 2.16):

- I** - Escoamento pulverizado;
- II** - Escoamento com superfície livre;
- III**- Escoamento com emulsão de ar;
- IV**- Ressalto com superfície livre;
- V** - Ressalto com escoamento em carga; e
- VI**- Ressalto afogado.

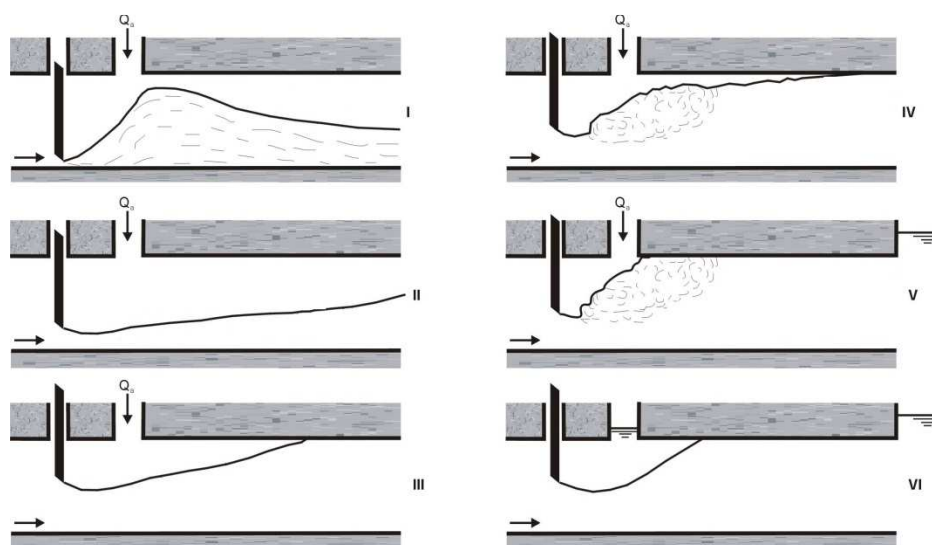


Figura 2.16 - Classificação dos tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos.

(Fonte: Adaptado de SHARMA, 1976).

Os quatro primeiros tipos correspondem a escoamentos à superfície livre, com grande quantidade de ar incorporado. O escoamento do tipo VI apresenta um ressalto hidráulico afogado, onde não há demanda de ar. O escoamento tipo V apresenta um ressalto hidráulico com escoamento em carga. Essa situação pode ocorrer no caso de descargas de fundo com saída afogada ou no caso de tomadas de água, durante o seu fechamento emergencial (ERBISTE, 1987). Esse também é o caso das comportas de controle de vazão de eclusas em sua situação crítica operacional.

O ressalto hidráulico se constitui de uma rápida transição de um escoamento supercrítico (número de Froude > 1) para um escoamento subcrítico (número de Froude < 1). Uma parte da energia cinética do escoamento se transforma em energia potencial provocando uma variação brusca da lâmina de água, a qual é acompanhada de uma grande intensidade de turbulência (RAJARATNAM, 1967 e RESCH *et al.*, 1976).

A partir da equação da quantidade de movimento e das seguintes hipóteses: distribuição de pressão hidrostática, distribuição de velocidades uniforme, efeitos viscosos negligenciáveis, seção transversal retangular, fundo do canal horizontal e plano, escoamento permanente e incompressível, e efeitos da entrada de ar desprezáveis, Bélanger verificou como condição para a ocorrência de um ressalto hidráulico a satisfação da relação entre as lâminas de água dos escoamentos subcrítico e supercrítico expressa na

Equação 2.6, vide Figura 2. 17 (CHOW, 1985; RAJARATNAM, 1967; RAJARATNAM, 1995, WU; RAJARATNAM, 1995 e TRIERWEILER, 2006).

$$\frac{Y_L}{Y_R} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_R^2} - 1 \right), \quad 2.6$$

na qual:

Y_R = lâmina do escoamento supercrítico, ou altura conjugada rápida;

Y_L = lâmina do escoamento subcrítico, ou altura conjugada lenta;

F_R = número de Froude do regime supercrítico (em Y_R);

$$F_R = \frac{U_0}{\sqrt{gY_R}}$$

U_0 = velocidade na seção da altura conjugada rápida; e

g = aceleração devida à gravidade.

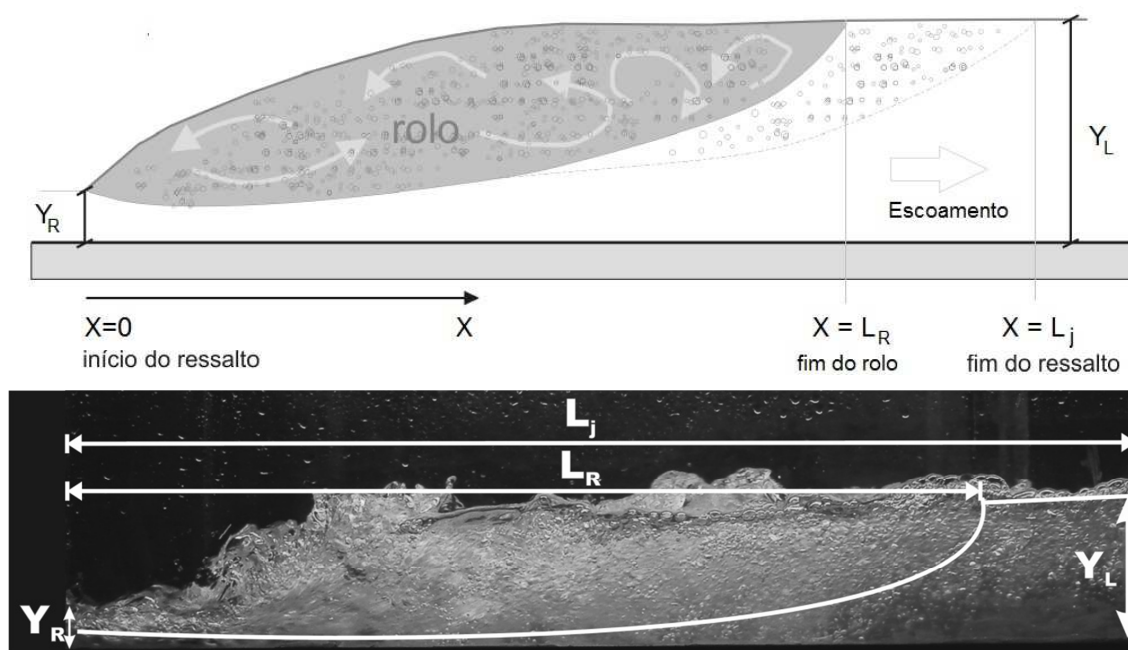


Figura 2. 17 - Ressalto hidráulico livre.

(Fonte: Adaptado de MEES, 2008).

A Equação 2.6 foi deduzida por Bélanger para o caso do ressalto hidráulico livre com $Y_T = Y_L$, sendo Y_T a altura de água na seção de regime subcrítico. Em função de Y_T , são definidos outros dois tipos de ressalto hidráulico (WU; RAJARATNAM, 1995):

- se $Y_T < Y_L$, o ressalto se formará em algum lugar a jusante (ressalto repellido); e
- se $Y_T > Y_L$, o ressalto se aproximará da seção da altura conjugada rápida (ressalto submergido).

O grau de submergência (S) pode ser definido por $S = \frac{Y_T - Y_L}{Y_L}$.

O ressalto hidráulico em condutos difere do ressalto hidráulico à superfície livre devido à limitação da altura pelas dimensões do conduto (GARGANO; HAGER, 2002). Em um conduto fechado a altura conjugada lenta é confinada pelo teto do conduto (EZZELDIN *et al.*, 2000).

De acordo com Rajaratnam (1967), a formação de ressalto hidráulico em condutos é observada a jusante de comportas de controle e em tubulações, escoando parcialmente cheias, quando há uma transição de alta para baixa declividade.

Haindl (1957) estudou um ressalto hidráulico formado em um conduto devido à mudança de declividade. Nesse caso, o ressalto hidráulico se forma na passagem do escoamento à superfície livre para um escoamento sob pressão e a quantidade de movimento do escoamento rápido (supercrítico) está em equilíbrio com a pressão depois do ressalto. O citado autor utilizou a equação da quantidade de movimento na forma da Equação 2.7 e considerando a Figura 2.18.

$$\alpha_1 \frac{\gamma}{g} QV_1 - \alpha_2 \frac{\gamma}{g} QV_2 = \Sigma P \quad , \quad 2.7$$

na qual:

- Q = vazão;
 V_1 = velocidade média do escoamento a montante do ressalto;
 V_2 = velocidade média do escoamento na seção plena;

- γ = peso específico da água;
 α_1 e α_2 = coeficientes de velocidade;
 P_1 e P_2 = forças externas à região do rolo, seções 1 e 2 respectivamente;
 P_3 = força correspondente ao peso do rolo; e
 ΣP = soma das forças externas.

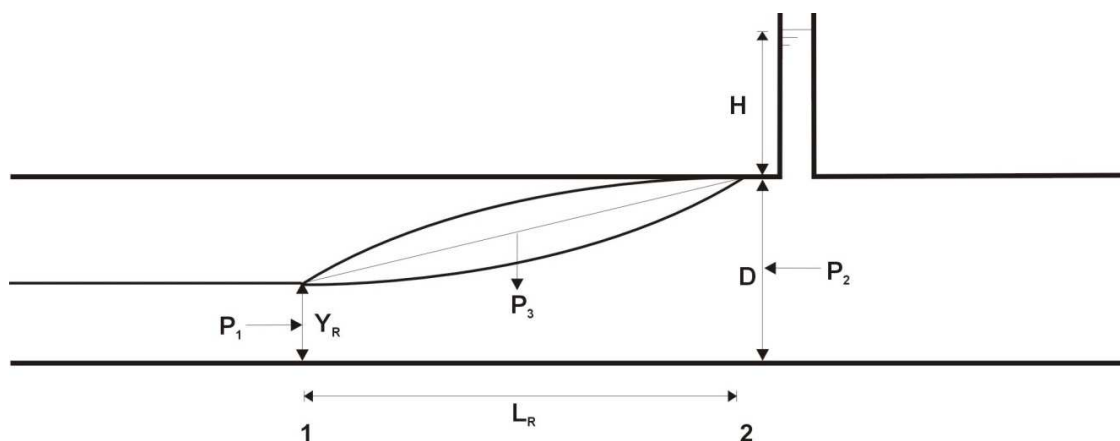


Figura 2.18 - Desenho esquemático de ressalto hidráulico em conduto.

(Fonte: Adaptado de HAINDL, 1957).

Assumindo uma distribuição de pressão hidrostática a montante e a jusante do ressalto, considerando a aeração do escoamento pelo ressalto hidráulico e assumindo uma distribuição uniforme das bolhas de ar ao longo da profundidade da seção transversal a jusante do mesmo, Haindl (1957) adaptou a equação do ressalto hidráulico em uma seção retangular na forma da Equação 2.8:

$$H = \frac{1}{D} \left[\frac{\alpha_1 q^2}{g D} - \frac{\alpha_2 q^2}{\omega g D} + \frac{Y_R^2}{2} - \frac{D^2}{2} \right], \quad 2.8$$

sendo:

- D = altura da seção transversal do conduto;
 H = carga hidráulica acima do teto do conduto;
 b = largura do conduto;

$$q = \frac{Q}{b} = \text{vazão específica; e}$$

$$\bar{\omega} = \frac{Q_{ar}}{Q_{ar} + Q_{\acute{a}gua}} = \text{coeficiente de concentração de ar.}$$

Rajaratnam (1965a) apresentou a Equação 2.9 para o ressalto hidráulico em condutos horizontais retangulares, parabólicos e triangulares.

$$\frac{Y_L^*}{Y_R} = \frac{\left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*} + n^* \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{2n^*+1} - \frac{n^* + 1}{n^*} F_R^2 \left[1 + \beta - \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*}\right]}{(1 + n^*) \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{2n^*}}, \quad 2.9$$

na qual:

$$Y_L^* = \text{altura conjugada lenta equivalente;}$$

$$\beta = \text{coeficiente aeração, apresentado na sequência;}$$

$$n^* = \text{coeficiente de forma que vale 1 para condutos retangulares, 1,5 para condutos parabólicos e 2 para condutos triangulares.}$$

O ressalto hidráulico em um conduto dissipa menos energia do que um ressalto livre para o mesmo número de Froude. Haindl (1957) apresentou o balanço de energia para o ressalto em conduto (Equação 2.10).

$$\Delta E = E_R - E_L = \left(Y_R + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right) - \left(D + H + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right), \quad 2.10$$

que considera:

$$\Delta E = \text{perda de energia específica no ressalto;}$$

$$E_R = \text{energia específica na seção da altura conjugada rápida; e}$$

$$E_L = \text{energia específica na seção da altura conjugada lenta.}$$

Para as simplificações $\rho = 1$ e $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, a Equação 2.10 assume a forma da Equação 2.11:

$$\Delta E = \frac{(D - Y_R)^3 - 3Y_R DH}{4Y_R D}, \quad 2.11$$

O comprimento do ressalto formado no interior de um conduto é assumido igual ao comprimento do rolo (HAINDL, 1957 e SMITH; CHEN, 1989).

Haindl (1957) apresenta o comprimento do ressalto como função da altura conjugada lenta, do diâmetro do conduto, da carga hidráulica de jusante, da declividade do conduto e do número de Froude (F_R : Froude do escoamento de montante; F_L : Froude do escoamento a jusante do ressalto), conforme expressam as Equações 2.12 e 2.13.

$$L_R = Cl[(D + H) - Y_R]. \quad 2.12$$

$$L_R \cos \theta = Cl \left[\left(H + \frac{D}{\cos \theta} \right) - (L_R + D \cdot \tan \theta) \operatorname{sen} \theta - \frac{Y_R}{\cos \theta} \right]. \quad 2.13$$

Nessas equações, Cl é um coeficiente auxiliar que tem seus valores obtidos experimentalmente. A Figura 2.19 apresenta os valores de Cl em função de F_L obtidos dos experimentos de Haindl (1957).

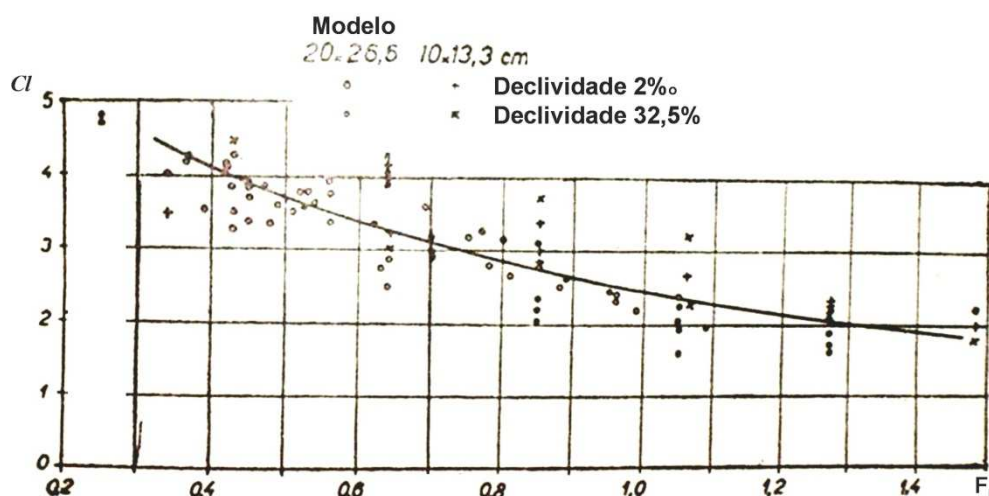


Figura 2.19 - Cl em função de F_L .

(Fonte: Adaptado de HAINDL, 1957).

A partir dos resultados desses mesmos experimentos, Haindl (1957) ainda apresentou o comportamento da relação entre o comprimento do ressalto e a altura conjugada rápida em função do número de Froude do escoamento de montante, como pode ser visualizado na Figura 2.20.

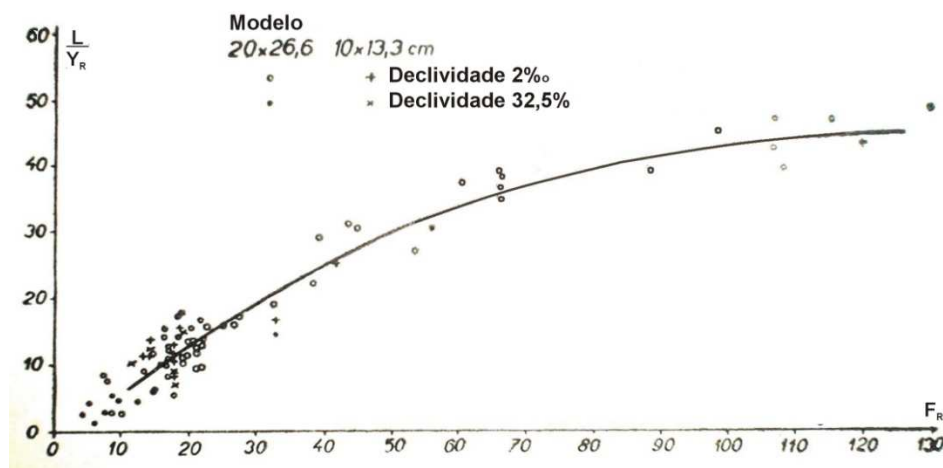


Figura 2.20 - Comprimento do ressalto.

(Fonte: Adaptado de HAINDL, 1957).

A demanda de ar é função da capacidade de mistura e transporte do escoamento (SHARMA,1976). No caso do ressalto em um conduto, a demanda de ar é dada pela Equação 2.14, a qual foi ajustada para dados experimentais de ressaltos em condutos circulares com declividades entre 0 e 30%, como apresenta a Figura 2.21 (KALINSKE; ROBERTSON, 1982).

$$\beta = 0,0066 (F_{vc} - 1)^{1,4}, \quad 2.14$$

na qual:

$$\beta = \text{coeficiente de aeração} = \frac{Q_a}{Q_w};$$

Q_a = vazão de ar;

Q_w = vazão de água;

F_{vc} = número de Froude na veia contraída.

Haindl e Sotorník (1957) fizeram uma vasta campanha experimental para verificar a quantidade de ar introduzida por um ressalto hidráulico em um conduto. Seus resultados validaram a Equação 2.14 de Kalinske e Robertson (1982).

USACE (1977) comparou vários dados de protótipo com os dados de Kalinske e Robertson (1982) e sugere, para projetos, a utilização da Equação 2.15 na determinação da

demanda de ar desse tipo de escoamento, a qual é mais conservadora do que a Equação 2.14, como pode ser verificado na Figura 2.22.

$$\beta = 0,03(F_{vc} - 1)^{1,06}$$

2.15

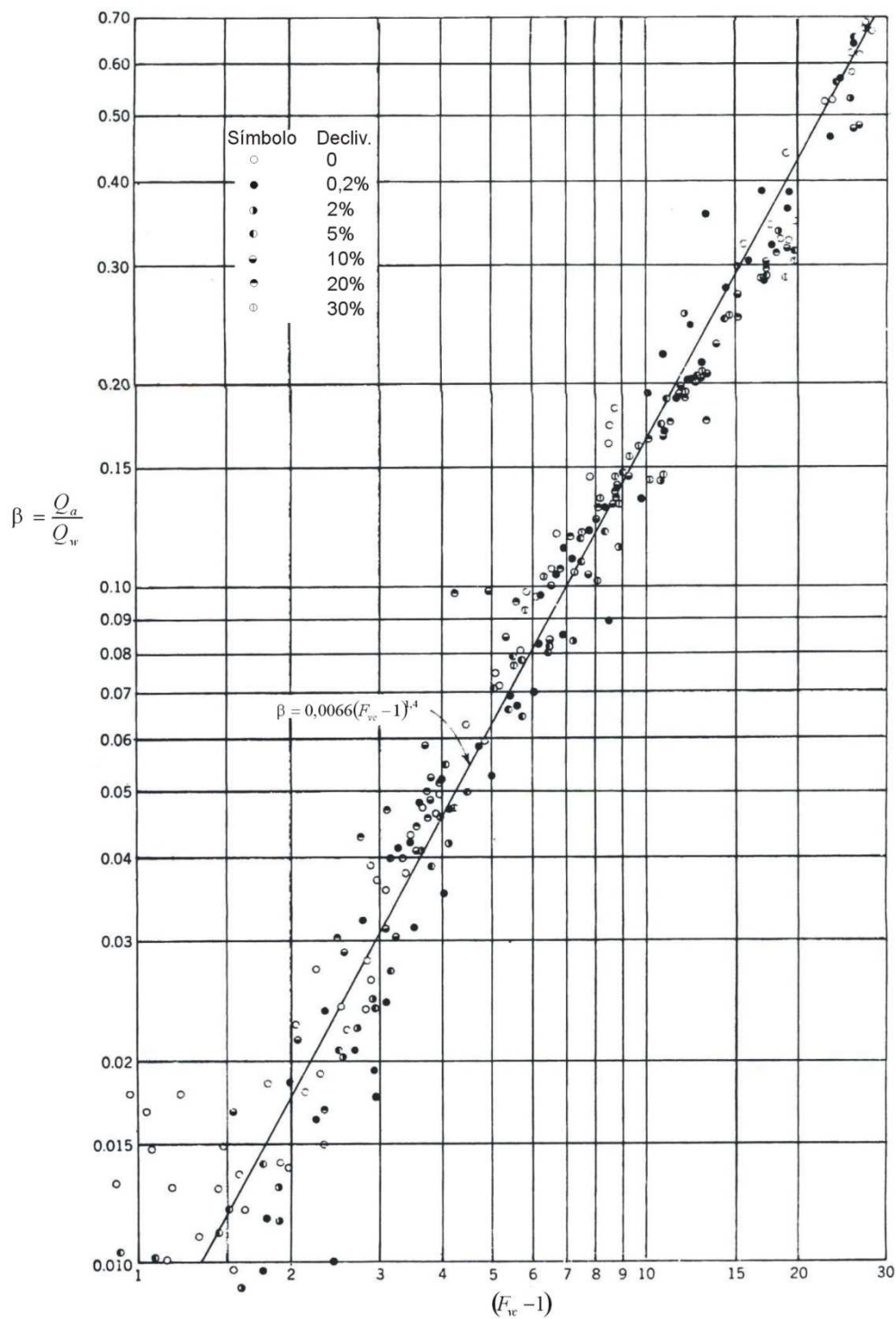


Figura 2.21 - Incorporação de ar pelo ressalto hidráulico.

(Fonte: KALINSKE; ROBERTSON, 1982).

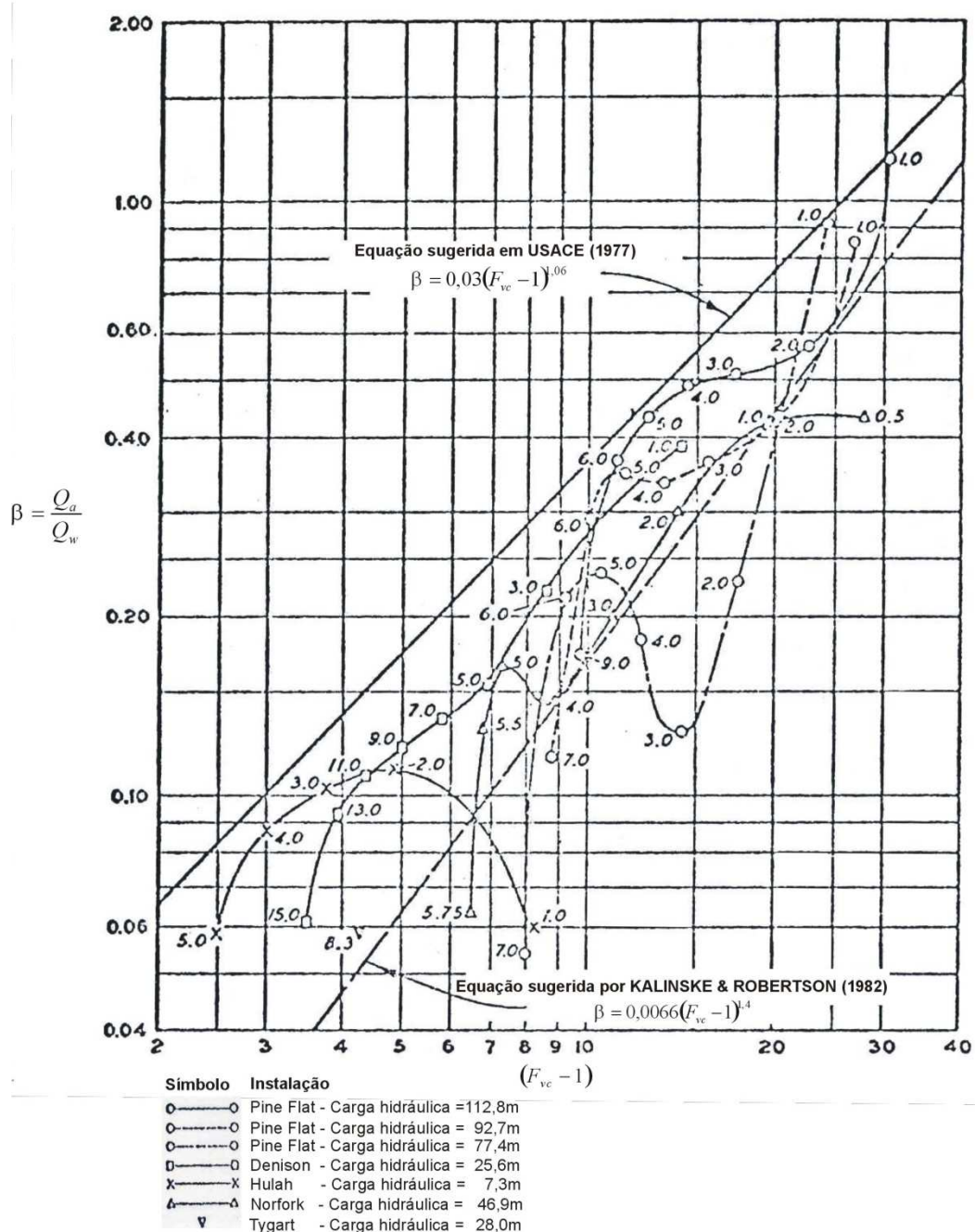


Figura 2.22 - Incorporação de ar pelo ressalto hidráulico – Comparação das equações de USACE (1977) e Kalinske e Robertson (1982).

(Fonte: USACE, 1977).

O estudo da demanda de ar é importante para o caso de comportas instaladas em condutos, pois sem a aeração as pressões de jusante podem chegar a níveis sub-atmosféricos, incorrendo em cavitação (SHARMA, 1976 e ERBISTE, 1987).

A instalação de tubos de aeração a jusante de comportas em condutos passou a ser feita a partir de 1909, após a verificação de sua eficiência no combate à cavitação nas comportas da barragem Pathfinder, nos Estados Unidos (ERBISTE, 1987).

A adição controlada de ar imediatamente a jusante das comportas das eclusas foi realizada com sucesso em várias eclusas de alta queda, provocando não apenas o aumento da pressão média, como também diminuindo o valor dos picos dos pulsos de pressão instantânea negativa (SANTOS, 1998).

Diferentemente do ressalto hidráulico à superfície livre, que libera o ar agregado, o ressalto em um conduto fechado carrega o ar para dentro do fluxo sob pressão (HAINDL, 1957). Assim, o maior problema que se apresenta quanto à adição de ar é a sua saída pela câmara da eclusa.

O comprimento da zona aerada a jusante do ressalto hidráulico equivale à distância necessária para as bolhas de ar passarem do fundo, na seção do final do ressalto, ao teto do conduto. O ar incorporado na região do rolo se distribui em toda a seção do escoamento na forma de bolhas, as quais são carregadas pela água na direção principal do escoamento e, simultaneamente, levadas para o teto do conduto pelas forças de empuxo (HAINDL, 1957).

Haindl (1957) apresenta a Equação 2.16 para a estimativa do comprimento da zona aerada (s) em condutos retangulares.

$$s = C_s \frac{Q}{\omega b c \sqrt{Y_R/D}}, \quad 2.16$$

na qual:

- c = velocidade de ascensão das bolhas em água parada; e
- ct = velocidade de ascensão das bolhas no escoamento em questão.

$C_s = \frac{\sqrt{Y_R/D}}{c'}$, sendo que a Figura 2.23 apresenta a correlação entre os valores de

C_s e da velocidade média do escoamento (V) dos modelos avaliados por Haindl

(1957) e $c' = \frac{ct}{c}$.

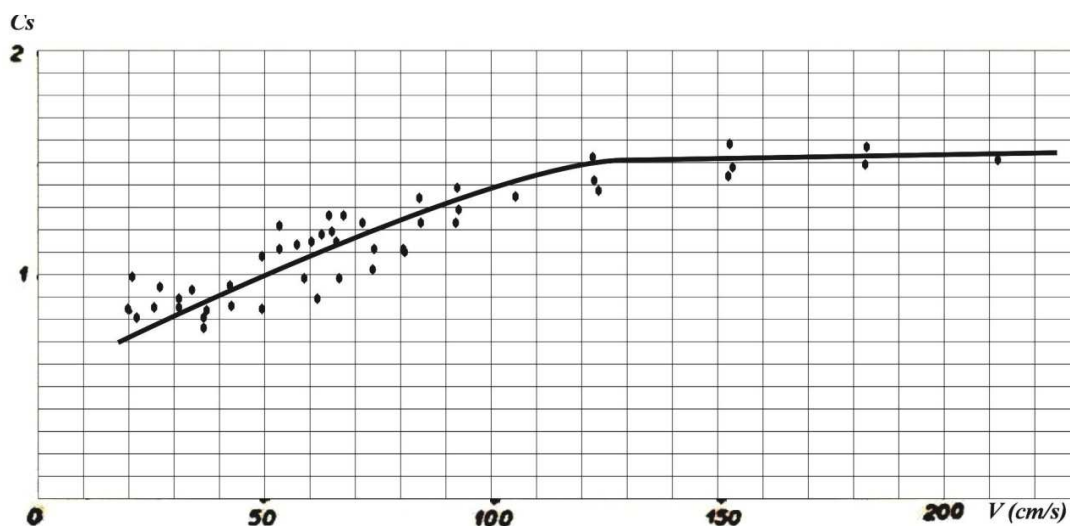


Figura 2.23 - Relação gráfica entre o coeficiente C_s e a velocidade média do escoamento.
(Fonte: HAINDL, 1957).

2.3 JATOS PARIETAIS

Pode-se considerar um jato parietal como um escoamento cisalhante ao longo de uma parede, no qual, em função da quantidade de movimento inicial, a velocidade na direção principal do escoamento adentra ao escoamento externo, conforme esquema apresentado na Figura 2.24 (LAUNDER; RODI, 1983).

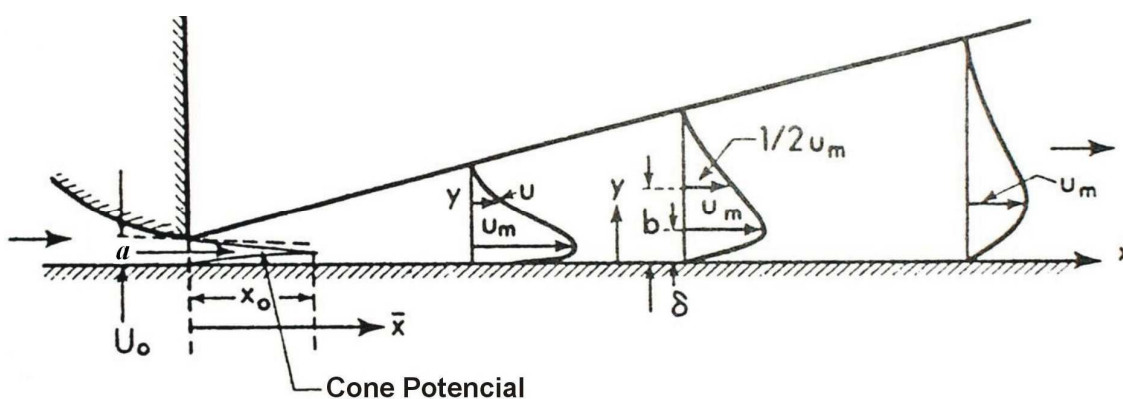


Figura 2.24 - Esquema de definições de um jato plano turbulento de parede.
(Fonte: Adaptado de RAJARATNAM, 1976).

A camada interna do jato plano de parietal é similar à camada limite turbulenta, onde há predominância dos efeitos viscosos, enquanto a camada externa assemelha-se a um jato (plano) livre, onde se desenvolve uma camada de mistura do tipo Kelvin-Helmholtz. A interação das grandes escalas de turbulência da camada externa com as pequenas escalas da camada interna cria um complicado campo de escoamento e determina o desenvolvimento do jato parietal (ERIKSSON *et al.*, 1998).

A camada cisalhante externa é caracterizada pela presença de estruturas coerentes, as quais apresentam um importante grau de organização local (SOUZA, 2005).

Quando a camada limite encontra a penetrante camada de cisalhamento, o cone potencial do jato é consumido e, a partir daí, o escoamento é dito completamente desenvolvido (RAJARATNAM, 1976).

Para um jato parietal clássico, sob gradiente de pressão zero e expansão infinita de um mesmo fluido, a proporcionalidade entre a velocidade e o comprimento pode ser dada pela Equação 2.17 (RAJARATNAM, 1976).

$$u_m \propto \frac{1}{\sqrt{x}}, \quad 2.17$$

na qual:

$$\begin{aligned} u_m &= \text{máximo valor da velocidade longitudinal em qualquer seção; e} \\ x &= \text{distância longitudinal a partir do bocal.} \end{aligned}$$

A partir de dados experimentais, as Equações 2.18 e 2.19 foram ajustadas para descrever as escalas de velocidade e comprimento em um jato parietal clássico (WU; RAJARATNAM, 1995).

$$\frac{u_m}{U_0} = \frac{3,5}{\sqrt{x/a}}, \quad 2.18$$

$$\frac{u_m}{U_0} = \frac{0,5}{\sqrt{x/L}}, \quad 2.19$$

nas quais:

- U_0 = velocidade imediatamente a jusante da comporta; e
 L = escala de comprimento igual ao valor de x onde $u_m = U_0/2$.

O ressalto submergido pode ser considerado como uma transição entre o ressalto hidráulico livre e o jato parietal clássico. Quanto maior a submergência (S), mais se aproxima o comportamento do escoamento do de um jato parietal clássico, como mostra a Figura 2.25 (WU; RAJARATNAM, 1995):

- se $S > 12F_R^{-1.3}$, o decaimento das escalas de velocidade será tal qual o de um jato parietal clássico;
- se $S < 12F_R^{-1.3}$, o decaimento das escalas de velocidade será tal qual o de um ressalto hidráulico livre; e
- a escala de comprimento para o ressalto submergido em termos da abertura do bocal (a) pode ser dada pela Equação 2.20:

$$\frac{L}{a} = 7,26F_R^{0,64}(1+S)^{0,77}. \quad 2.20$$

Ressaltos hidráulicos submergidos podem usualmente ser tratados como jatos parietais bidimensionais submergidos (RAJARATNAM, 1965b *apud* DEY et al., 2010; e McCORQUODALE, 1986 *apud* DEY et al., 2010).

A Figura 2.26 apresenta o desenho esquemático de um jato parietal submergido. Pode-se visualizar em (a) que o jato é caracterizado por duas camadas de fluxo de cisalhamento, influenciadas pela parede e pela camada sobrejacente de fluxo circulatório. No perfil de velocidade na direção x , em (b), delimitam-se as camadas do escoamento. Abaixo do ponto de máxima velocidade o fluxo é caracterizado por uma camada limite, chamada camada interna do jato, enquanto que o fluxo na zona superior (acima do ponto de velocidade máxima) constitui um fluxo semelhante a um jato livre. A camada externa do jato se delimita pelo ponto de máxima velocidade e pelo ponto de inflexão do perfil de velocidades na direção x . A camada interna do fluxo circulatório vai do ponto de inflexão até o ponto de velocidade nula na direção x , a partir de onde a velocidade inverte de sentido e denomina-se camada externa do fluxo de recirculação (DEY *et al.*, 2010).

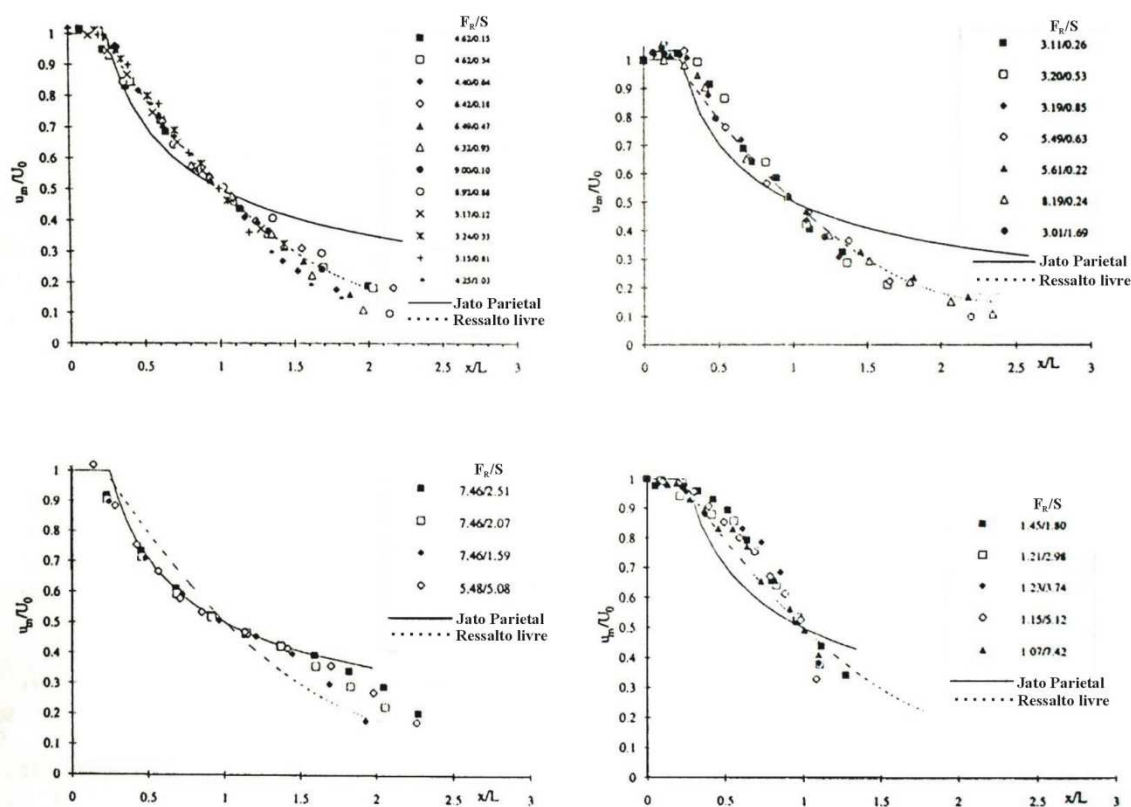


Figura 2.25 - Comparação dos dados de um ressalto submergido com as curvas características de um ressalto hidráulico livre e um jato parietal clássico.

(Fonte: WU; RAJARATNAM, 1995).

De acordo com Rajaratnam (1967), o perfil das pressões junto à base do ressalto hidráulico submergido é basicamente o mesmo do perfil da superfície de água. Conforme aumenta a submergência, a distribuição das pressões na maioria dos ressaltos submergidos se torna essencialmente hidrostática.

Observa-se que a superfície de água apresenta um nível mais baixo imediatamente a jusante da comporta (δ_w), aparentemente para produzir o gradiente de pressão necessário ao fluxo de recirculação e à entrada do jato. Assumindo uma distribuição de pressão hidrostática na comporta e na seção de jusante onde o jato parietal em expansão atinge a superfície de água e ocupa toda a profundidade, e uma distribuição de velocidades uniforme sob a comporta e na mesma seção de jusante, Ead e Rajaratnam (2002) propuseram a aproximação teórica apresentada na Equação 2.21.

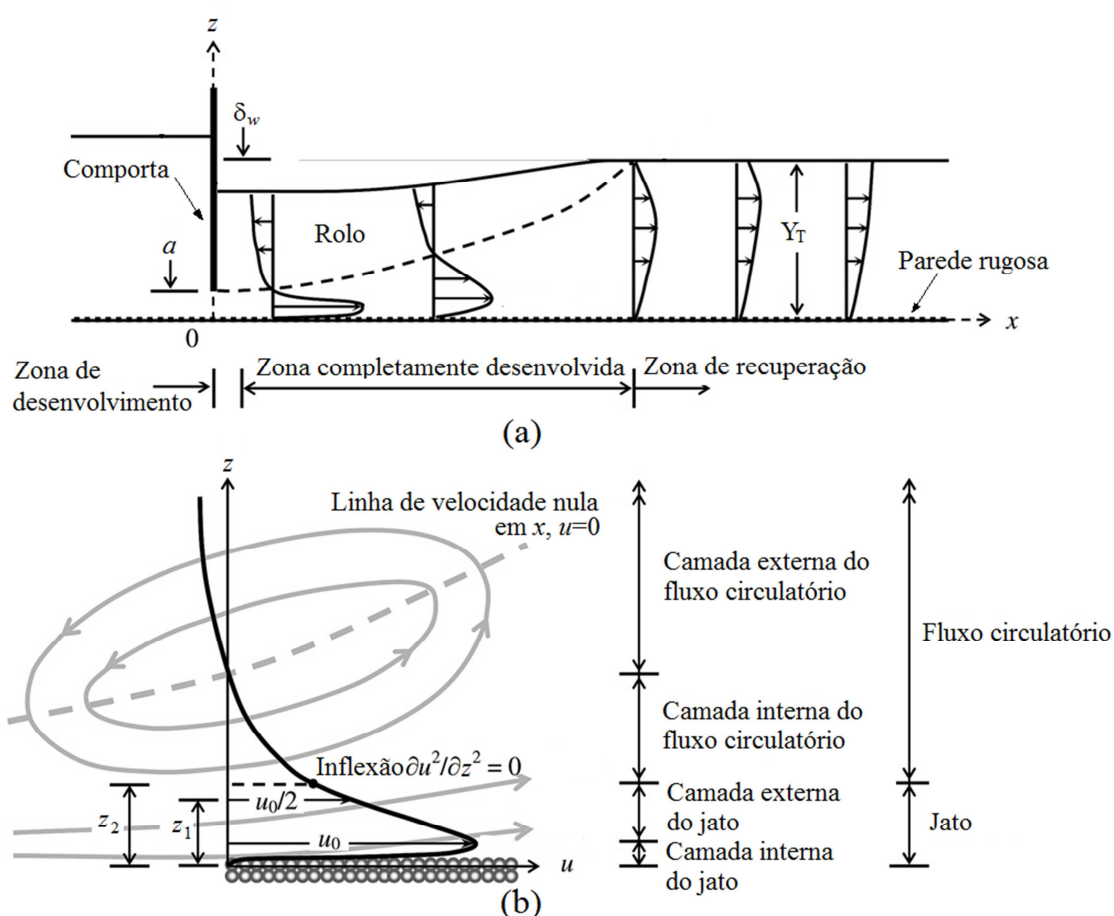


Figura 2.26 - Desenho esquemático de jato parietal submerso. (a) Zonas do escoamento. (b) Típico perfil de velocidades na direção x para a zona completamente desenvolvida.

(Fonte: DEY *et al.*, 2010)

$$\frac{\delta_w}{a} = \frac{Y_T}{a} - \sqrt{\left(\frac{Y_T}{a}\right)^2 - 2 \left[\frac{Y_T - 1}{a} \right] F_R^2}, \quad 2.21$$

na qual F_R é o número de Froude do escoamento na seção sob a comporta. O aumento do valor de F_R resulta em um grande abaixamento no nível de água imediatamente a jusante da comporta e em sua vizinhança, o que por sua vez aumenta o fluxo de escoamento recirculante (EAD; RAJARATNAM, 2002).

Os jatos parietais bidimensionais submersos, ou os ressaltos hidráulicos submersos a jusante de comportas, apresentam comportamento similar ao escoamento a jusante de comportas de controle de vazão em eclusas. Porém, a existência da parede

superior do conduto (teto) no aqueduto das eclusas confina o escoamento e o que seria o abaixamento de nível de água imediatamente a jusante da comporta é verificado como redução na pressão.

Os primeiros a desenvolver uma teoria completa sobre jatos confinados em um conduto de seção constante foram Craya e Curtet, em 1955 (ZHU, 1986). Os estudos experimentais de Curtet resultaram em algumas observações sobre o escoamento de um jato plano em um conduto, vide Figura 2.27 (RAJARATNAM, 1976):

- Se a velocidade do escoamento secundário (U_2) é apreciável, o jato principal se expande simetricamente dentro do conduto;
- Quando a velocidade do escoamento secundário é reduzida a um determinado valor, duas zonas de recirculação são formadas, uma de cada lado, junto às paredes do conduto (Figura 2.28);
- Com uma maior redução da velocidade do escoamento secundário, os turbilhões crescem em tamanho e apresentam extensão espacial desigual; e
- Para velocidades ainda menores do escoamento secundário, o jato passa a oscilar.

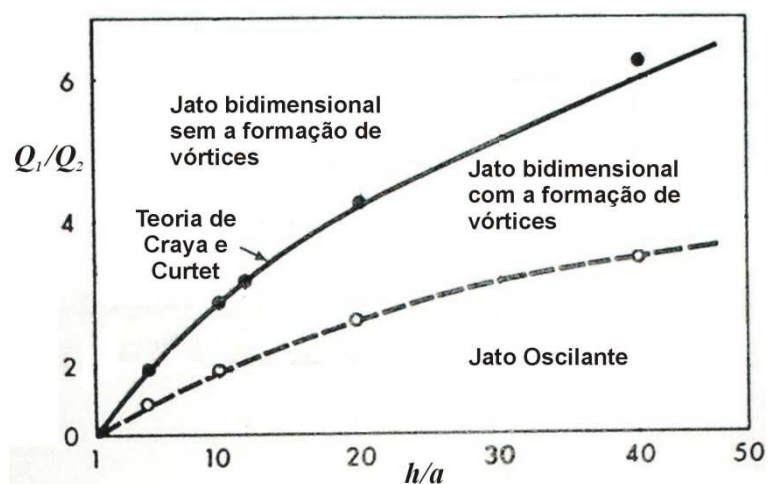


Figura 2.27 - Características do escoamento de jatos planos confinados.

(Fonte: RAJARATNAM, 1976).

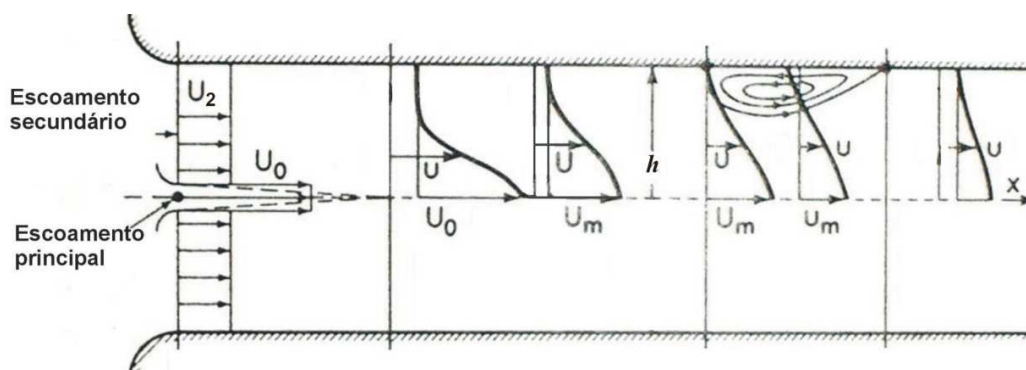


Figura 2.28 - Exemplo de jato plano confinado com recirculação junto às paredes
(Fonte: RAJARATNAM, 1976).

2.4 CAVITAÇÃO

A cavitação normalmente ocorre quando um líquido, a uma temperatura constante, é submetido a pressões iguais ou inferiores à de vapor. Se a pressão local em algum ponto do líquido atingir a pressão de vapor e existirem núcleos gasosos, poderão se formar cavidades de vapor. Se a pressão se mantiver próxima da pressão de vapor e a cavidade atingir um diâmetro crítico, ela explodirá. Se a pressão circundante aumentar acima da pressão de vapor, a bolha se tornará instável e implodirá. Tal implosão, ou colapso, poderá ser muito violento e acompanhado por ruídos, vibrações e possível erosão das superfícies sólidas próximas (TULLIS, 1982). Quando as bolhas colapsam, a pressão atinge valores bastante elevados e quanto menores as bolhas e maior sua quantidade, maior será a deterioração das superfícies sólidas (BORSARI, 1986 *apud* KORMANN, 2002).

A cavitação é um fenômeno verificado somente em líquidos; ela é dinâmica, necessitando, para ocorrer, de uma sequência de eventos que se inicia com a existência de condições propícias à formação e crescimento das cavidades e se estende até a implosão ou explosão dessas bolhas, sendo diretamente ligada ao campo de pressões existente no escoamento. Caracteriza-se, então, como um escoamento com mudança de fase nas regiões de baixa pressão (GIKAS, 1982 e BILUŠ *et al.*, 2007).

Desde 1910, data da construção do primeiro túnel de cavitação por Sir Charles Pearson, a cavitação vem sendo estudada, porém, até hoje, devido à complexidade desse fenômeno e ao grande número de parâmetros que o influenciam, não foi completamente definida ou resolvida matematicamente (BILUŠ *et al.*, 2007).

2.4.1 TIPOS DE CAVITAÇÃO

A cavitação pode ser (TULLIS, 1982):

- Gasosa: ocorre quando existe uma considerável quantidade de ar em suspensão na água, ou quando o processo de cavitação é suficientemente lento, permitindo o aumento da quantidade de ar no interior da cavidade de vapor em decorrência da desgaseificação do líquido. Esse tipo de cavitação não é tão violento e normalmente não deverá criar uma situação de algum interesse; e
- Vaporosa: ocorre quando existe pouquíssimo ar no líquido, de forma que a cavidade consiste quase exclusivamente de vapor; as taxas de crescimento e de colapso e as pressões geradas devido ao colapso da cavidade serão extremamente elevadas e poderão causar danos de monta.

Podem-se distinguir tipos de cavitação segundo a forma como ela surge no escoamento (GIKAS, 1982):

- Cavitação por deslocamento das cavidades: o deslocamento das cavidades implica na existência, no meio líquido, de condições adequadas à formação de cavitação. Havendo núcleos de cavitação (podem ser impurezas, ar dissolvido ou se originar de fendas, capazes de reter ar, existentes em superfícies sólidas limítrofes) no meio líquido, tais núcleos expandem-se até um máximo e em seguida entram em colapso, movendo-se sempre com o líquido;
- Cavitação afixada e Supercavitação: a origem deste tipo de cavitação é uma superfície sólida que pode ser um corpo imerso num meio líquido ou a própria superfície que confina o escoamento. Sua principal característica é a de existir uma separação do escoamento sobre a superfície sólida de maneira a formar uma cavidade que se mantém afixada a essa superfície e que é praticamente permanente. Nos limites exteriores dessa cavidade, surgem pequenas cavidades que seguem o processo de cavitação por deslocamento. Quando as condições são tais que a cavidade se estende além das dimensões da superfície sólida em que é gerada, destacando-se

da superfície e atingindo o meio líquido, a cavidade é denominada “supercavidade” e o processo passa a ser denominado “supercavitação”;

- Cavitação por vórtices: esta modalidade de cavitação origina-se nos núcleos de vórtices presentes num escoamento, em regiões de elevado cisalhamento; e
- Cavitação por vibração: origina-se em campos de pressão “vibratórios”, isto é, nos quais as pressões são alternadas e continuamente aumentadas e diminuídas segundo uma determinada frequência.

2.4.2 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS

Para se definir um parâmetro de cavitação deve-se ter em mente que esse parâmetro deve assumir um valor único em condições cavitantes dinamicamente semelhantes e que deve ser capaz de descrever as condições do escoamento. A expressão matemática desse parâmetro é definida admitindo-se inicialmente um corpo sólido imerso em um líquido de propriedades constantes em movimento com velocidade de referência V_0 ao longe. Se ρ é a massa específica, P_0 é a pressão absoluta no ponto de referência, ao longe, e P é a pressão absoluta em um ponto do corpo imerso, o coeficiente de pressão CP pode ser definido como na Equação 2.22 (GIKAS, 1982).

$$CP = \frac{P_0 - P}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} . \quad 2.22$$

Considerando como referências a pressão e a velocidade médias no conduto imediatamente a montante do poço da comporta, Pickering (1981) *apud* Hammack e Stockstill (2009) apresentou os campos de linhas isobáricas utilizando-se dos valores para CP conforme a Figura 2.29.

A previsão do início da cavitação baseia-se na identificação do abaixamento da pressão no escoamento. Considerando a pressão crítica de cavitação coincidindo com a tensão de vapor (P_V), o coeficiente de pressão mínimo (CP_{\min}) correspondente à cavitação incipiente seria definido pela Equação 2.23 (PINTO, 1988).

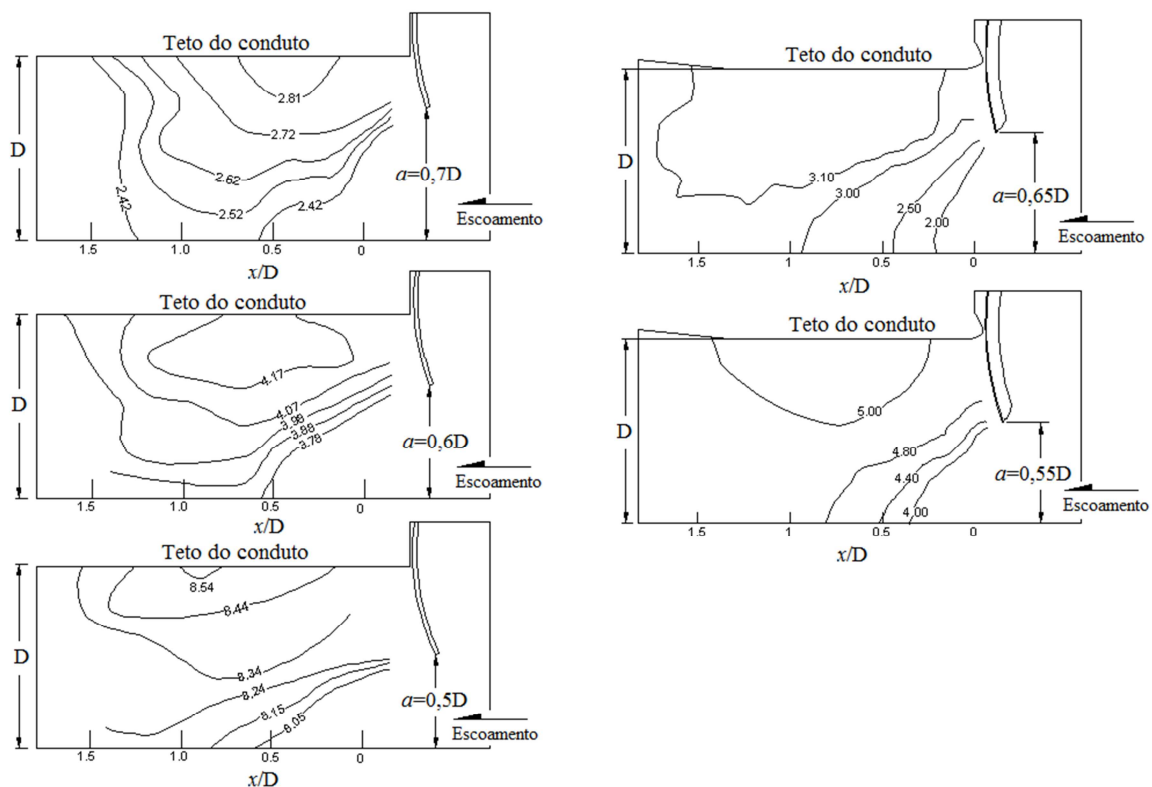


Figura 2.29 - Campos de linhas isobáricas utilizando-se dos valores para CP .

(Fonte: PICKERING, 1981 *apud* HAMMACK; STOCKSTILL, 2009).

$$CP_{\min} = \frac{P_V - P_0}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad 2.23$$

O coeficiente, ou índice, de cavitação incipiente (σ_i) é igual a $-CP_{\min}$, que, em termos de carga hidráulica, pode ser expresso como na Equação 2.24.

$$\sigma_i = \frac{H - H_V}{\frac{V_0^2}{2g}}, \quad 2.24$$

na qual:

- H = carga hidráulica no ponto de referência;
- H_V = carga hidráulica correspondente à pressão de vapor; e
- g = aceleração devida à gravidade.

O início e a intensidade da cavitação são definidos pela estrutura dinâmica do escoamento: pela distribuição de velocidades, pela camada limite, pelos campos de pressão média e flutuações de pressão, entre outros (QUINTELA; RAMOS, 1980).

Segundo Arndt (1981), a cavitação incipiente não é adequadamente descrita por um parâmetro isolado, como σ , e as principais razões seriam:

- O campo de pressões não é descrito adequadamente por um modelo de escoamento de fluido ideal, os efeitos da turbulência e outros fenômenos viscosos dominam o problema; e
- A pressão crítica de incipiência não é a pressão de vapor e pode ser tanto maior quanto menor do que P_v , dependendo da situação. Em geral, líquidos podem sustentar tensões e mais de um tipo de processo de cavitação pode ocorrer em um mesmo campo de escoamento. O crescimento da bolha pode ser resultado da formação da fase de vapor, ou ser devido à liberação de gás dissolvido, ou à combinação de ambas.

No entanto, o índice de cavitação σ é, usualmente, adotado na análise do potencial de cavitação em estruturas hidráulicas.

2.4.3 CAVITAÇÃO EM RESSALTOS HIDRÁULICOS

Escoamentos altamente turbulentos podem produzir condições favoráveis à ocorrência de cavitação (NARAYANAN, 1980). A formação das cavidades de vapor tem sido observada principalmente nos núcleos de baixa pressão dos vórtices (BAUR; KÖNGETER, 2001).

A natureza macroturbulenta do fluxo no interior do ressalto hidráulico é responsável pela geração de fortes flutuações de pressão (LOPARDO, 1992). Uma medida de sua intensidade é a amplitude média quadrática (RMS – *root mean square*), mas, no ressalto hidráulico livre, os valores instantâneos da parte flutuante podem chegar a cinco vezes o valor da RMS. Assim, quando a soma da média com a pressão flutuante em um instante se aproximar da pressão de vapor à temperatura ambiente, espera-se a formação de cavidades de vapor (NARAYANAN, 1980).

A partir da análise dimensional da amplitude das flutuações de pressão, Lopardo (1986) expressa o parâmetro de pressões flutuantes $C'p$ como função de x/Y_R e F_R . Considerando a Equação 2.25, onde p' é a amplitude da flutuação de pressão, e resultados de medições experimentais em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro, para o F_R variando entre 4,5 e 10, o referido autor apresenta o comportamento do parâmetro de pressões flutuantes como na Figura 2.30.

$$C'p = \frac{\sqrt{p'^2}}{\frac{1}{2}\rho U_0} \quad 2.25$$

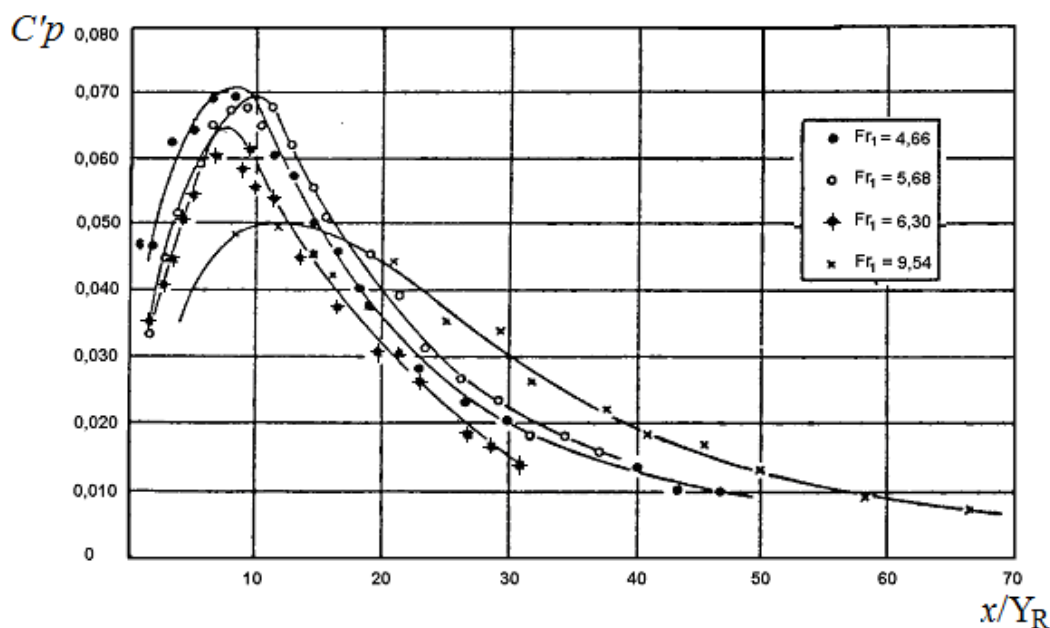


Figura 2.30 - Parâmetro de pressões flutuantes para um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro.

(Fonte: Adaptado de LOPARDO, 2005).

Pode-se verificar que $C'p$ alcança seu máximo valor ($C'p \approx 0,07$) para $F_R = 6,3$, concentrando-se as maiores amplitudes para qualquer F_R na faixa de $8 \leq x/Y_R \leq 12$ (LOPARDO, 2005). Os valores apresentados por Lopardo (1986) são cerca de 20% menores que os publicados por Lopardo e Solari (1980) para ressaltos formados a jusante de um comporta de fundo.

A análise do parâmetro de pressões flutuantes para um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta foi apresentado por Lopardo e Sauma Haddad (1996), conforme a Figura 2.31.

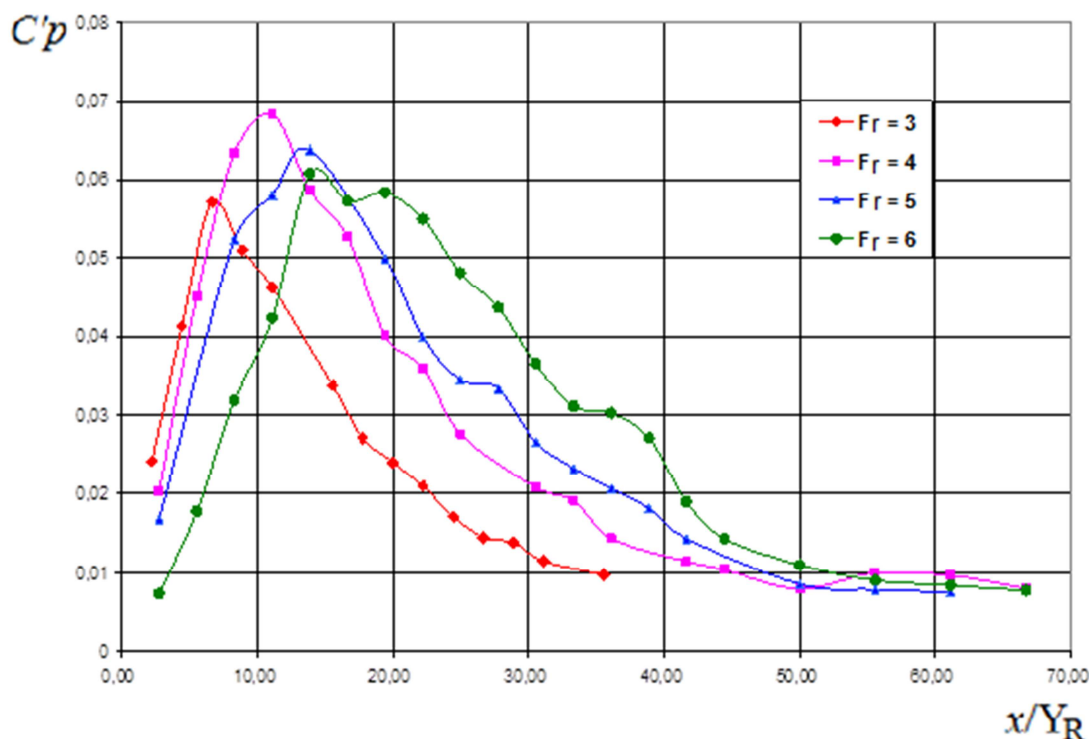


Figura 2.31 - Parâmetro de pressões flutuantes para um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta.

(Fonte: LOPARDO; SAUMA HADDAD, 1996).

Trierweiler (2006) avaliou o campo de pressões na base de um ressalto hidráulico submergido, a jusante de uma comporta, para diferentes graus de submergência. Os resultados de $C'p$ encontrados pelo autor estão apresentados na Figura 2.32, para o mesmo F_R e diferentes graus de submergência, e demonstram valores maiores do coeficiente de flutuação de pressão para graus de submergência maiores.

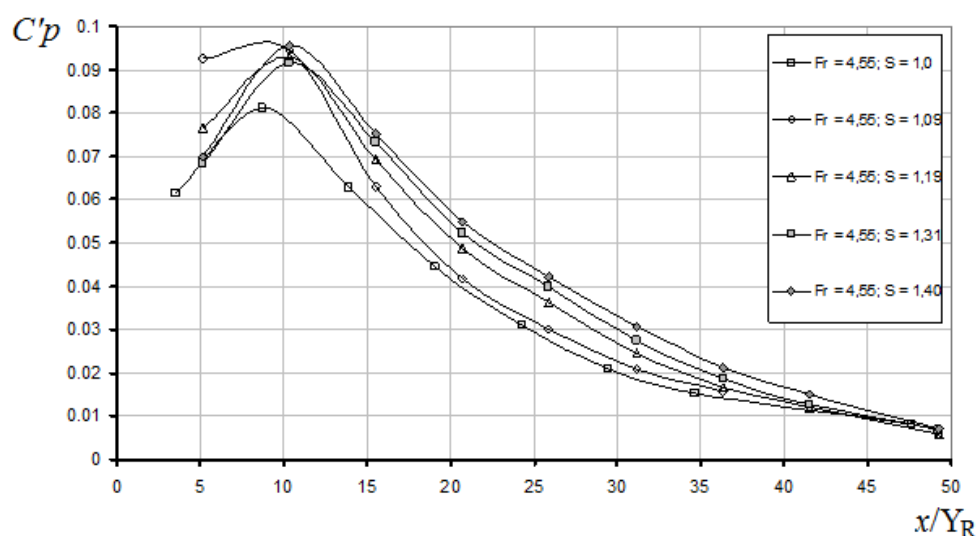


Figura 2.32 - Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversas submergências e $F_R=4,5$.

(Fonte: TRIERWEILER, 2006).

2.4.4 CAVITAÇÃO A JUSANTE DE COMPORTAS DE ECLUSAS

No início do processo de enchimento, ou de esvaziamento, são típicas as altas velocidades, a queda brusca da pressão média e as amplas flutuações de pressão a jusante das comportas, o que incorre em um grande potencial de cavitação, principalmente nas eclusas de médias e altas quedas (USSAMI, 1980, e SANTOS, 1998).

Observações em modelos e em protótipos revelaram que para a abertura de 60% da comporta ocorrem as condições mais críticas de cavitação (SANTOS, 1998). A Figura 2.33 apresenta os resultados obtidos por Ussami *et al.* (1983b) para o caso da eclusa 1 de Tucuruí.

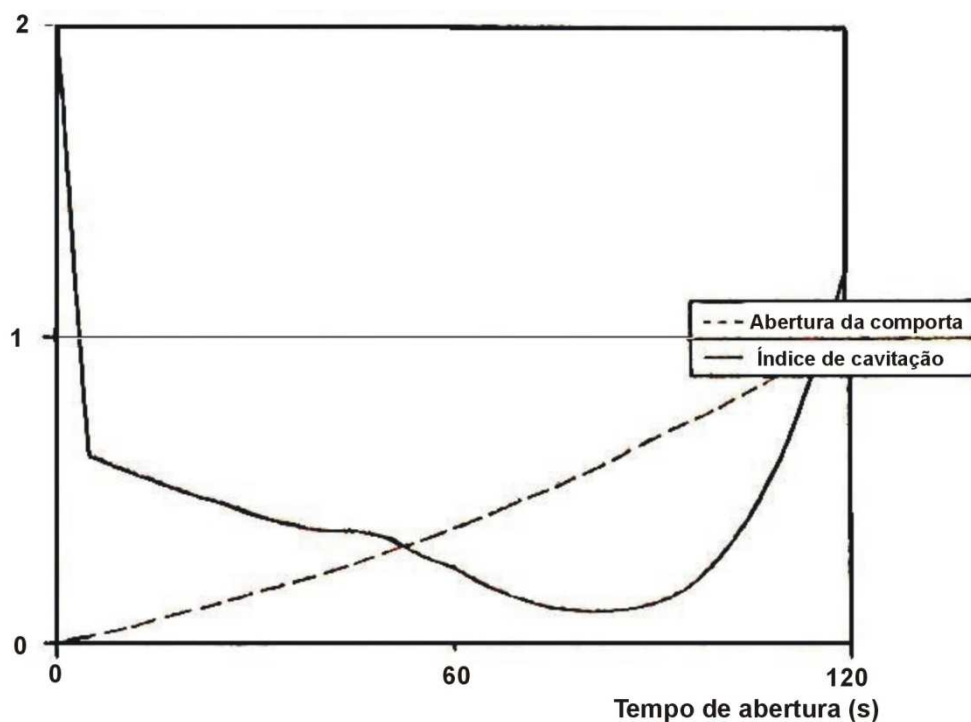


Figura 2.33 - Comportamento do índice de cavitação para o sistema de enchimento da eclusa 1 de Tucuruí.

(Fonte: Adaptado de USSAMI *et al.*, 1983b).

Palauro (2012) avaliou, a partir de dados de modelagem física, as pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida em eclusa de navegação, realizando ensaios em regime permanente e em regime transitório. Segundo o referido autor, o comportamento das pressões mínimas para regime transitório e permanente é distinto, sendo que para o regime permanente as pressões mínimas ocorrem para graus de abertura da comporta menores, entre 20% e 40%, e para o regime transitório, entre 30% e 70%. Palauro (2012) considera válida a análise das pressões em regime permanente e conclui que as pressões mínimas nesse regime podem ser utilizadas para estimar as pressões mínimas em regime transitório.

As principais soluções adotadas para amenizar os efeitos ou eliminar a cavitação são: a utilização de revestimentos resistentes (aço), o abaixamento da cota de assentamento das comportas, a adoção de alterações geométricas, a aplicação de leis de manobra especiais para as comportas e a introdução de ar (USACE, 1975; OLIVEIRA *et al.*, 1983, e SANTOS, 1998).

A adição de água não leva a resultados consideráveis, a não ser em grandes quantidades, o que exigiria um segundo duto. Dessa forma, não é uma solução utilizada. A execução de concretos especiais também tem se revelado com limitações e esses têm sido mais estritamente aplicados às situações de menor efeito erosivo da cavitação, como no caso dos partidores de fluxo horizontais ou verticais (SANTOS, 1998). A colocação de revestimentos resistentes é onerosa e não elimina o problema; somente retarda os efeitos da erosão por cavitação.

As leis de manobra especiais ficam limitadas à capacidade dos equipamentos de acionamento e a determinadas situações que causariam esforços hidrodinâmicos excessivos. A adição de ar vem sendo amplamente utilizada. Porém, a quantidade de ar é limitada, pois quando o ar é expelido do sistema ocasiona perturbações na superfície de água dentro da câmara da eclusa que podem provocar acidentes com as embarcações. Assim associam-se à adição de ar, alterações geométricas da seção a jusante da comporta e o rebaixamento da sua cota de implantação.

As pesquisas atuais têm investigado novas geometrias para os aquedutos da região das comportas. A primeira adaptação da geometria a jusante das comportas diz respeito à introdução de uma ampliação no teto do aqueduto a jusante das comportas (Figura 2.34). Com isso ocorre um aumento da perda de carga localizada e uma redução do potencial de cavitação do escoamento (PICKERING, 1981; PERKINS, 1979 *apud* USACE, 2006).

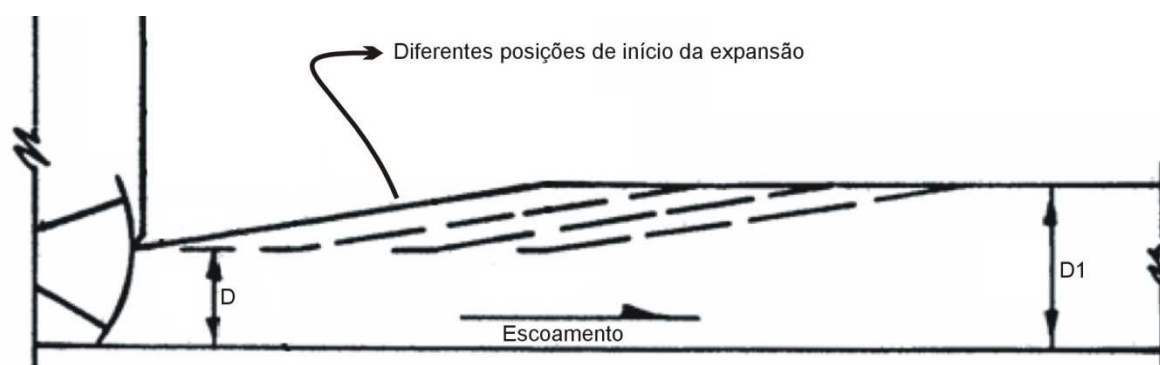


Figura 2.34 - Expansão no teto do aqueduto.

(Fonte: Adaptado de PERKINS, 1979 *apud* USACE, 2006).

A pesquisa americana verificou que a inclinação de 10% é a mais interessante em termos de ganho de pressão e que quanto mais próximo da comporta estiver o início da expansão, mais eficiente ela será (SANTOS, 1998).

Shinqin *et al.* (1999) estudaram o rebaixamento da comporta e a introdução de expansões laterais, como mostra a Figura 2.35.

Com o rebaixamento da comporta ocorre a elevação da pressão média e a “câmara” de maiores dimensões formada a jusante das comportas auxilia na redução das velocidades, reduzindo-se o potencial de cavitação do escoamento.

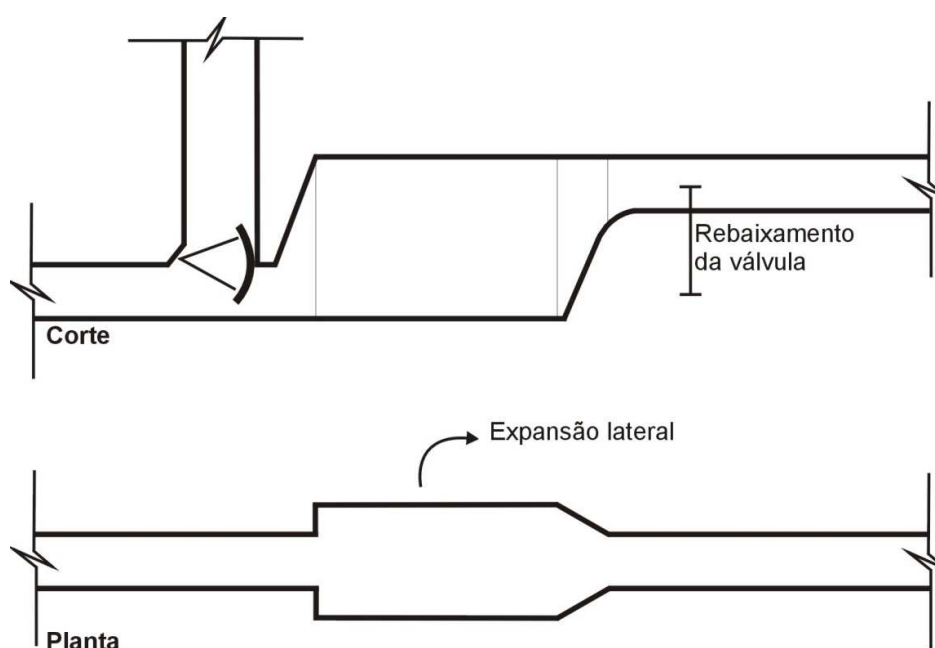


Figura 2.35 - Geometria com rebaixamento da comporta e introdução de expansões laterais.

(Fonte: Adaptado de SHIQIN *et al.*, 1999).

Shengyi *et al.* (2005) avaliaram numericamente a combinação das expansões do teto e da base do aqueduto, estrutura como a visualizada na Figura 2.36. Os autores verificaram que essa geometria apresentou um escoamento mais estável devido ao maior espaço existente a jusante das comportas, ajudando a reduzir a velocidade e melhorar as pressões nessa região em comparação com a geometria que possui somente expansão no teto.

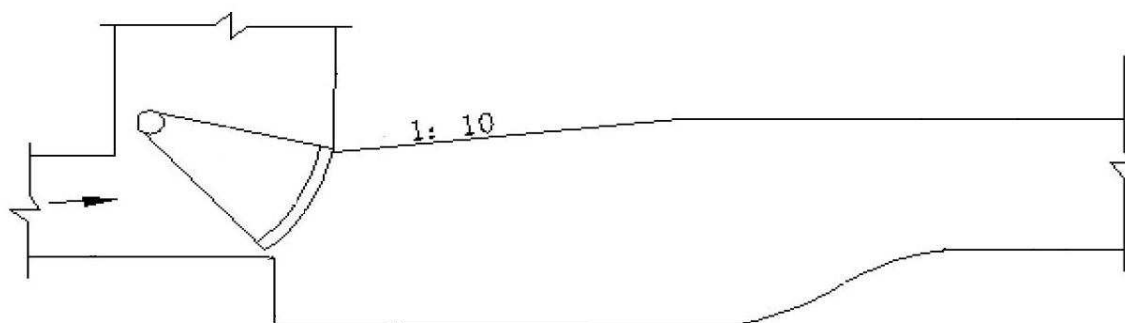


Figura 2.36 - Geometria com expansões na base e no teto.

(Fonte: SHENGYI *et al.*, 2005).

2.5 MODELAGEM DO ESCOAMENTO EM SISTEMAS DE ENCHIMENTO E ESVAZIAMENTO DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

Historicamente a engenharia hidráulica associa técnicas complementares para entender e lidar com sistemas complexos de escoamento, como medições e observações em protótipos, estudos de laboratório em modelos físicos reduzidos e modelagens matemáticas.

A complexidade dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas é tal que se torna extremamente difícil que sejam feitas análises detalhadas e precisas dos fenômenos hidráulicos envolvidos sem o auxílio de ferramentas adequadas (USSAMI *et al.*, 1983a).

Os tópicos a seguir apresentam informações sobre investigações com base em modelos físicos e numéricos sobre o escoamento em sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas.

2.5.1 MODELAGENS FÍSICAS

Os ensaios em modelo reduzido têm como finalidade a disponibilização de dados que tornem possível a investigação e análise do sistema hidráulico operacional de uma eclusa, com o objetivo de compreender os fenômenos hidráulicos decorrentes das operações de enchimento e esgotamento da câmara da eclusa e de otimizar essas estruturas.

De acordo com Canholi (1984), as atividades principais dos estudos experimentais das eclusas estão ligadas à determinação:

- Dos tempos de enchimento e esgotamento da câmara para as diversas condições de operação;
- Das forças resultantes nas embarcações-tipo, para as diversas posições das mesmas no interior da câmara e para as diversas condições de operação;
- Das pressões instantâneas a jusante das comportas de controle, para subsídio aos estudos de verificação à cavitação, de grande importância nos estudos de eclusas de média e alta queda;
- Das condições do escoamento nas áreas de aproximação e junto às tomadas de água e restituição, e sua interferência com a rota das embarcações;
- Do desenvolvimento das pressões médias em todo o circuito hidráulico de enchimento e esgotamento da câmara;
- Dos coeficientes de perda de carga para o subsídio aos cálculos teóricos de enchimento e esgotamento;
- Dos níveis de água atingidos na câmara ao final do enchimento e do esgotamento (sobre-enchimento e sobre-esgotamento), e dos respectivos processos de amortecimento. A partir dessas determinações, são estudadas experimentalmente as formas de minimizar ou eliminar os mesmos; e
- Dos desníveis, localizados e globais, no interior da câmara, durante os processos de enchimento e esvaziamento.

Os estudos em modelos reduzidos de eclusas de navegação são realizados com a finalidade de investigar os fenômenos hidráulicos relacionados com os sistemas de enchimento e esvaziamento, bem como os seus efeitos sobre as condições operacionais das eclusas. Dessa forma, procuram-se com as investigações em modelo reduzido (USSAMI *et al.*, 1983a):

- Verificar e assegurar o desempenho do sistema de enchimento e esvaziamento da eclusa, antes de sua construção;
- Corrigir, ajustar e controlar os comportamentos e efeitos não desejados;
- Investigar e possibilitar a análise de alternativa de solução que redundam em melhorias no seu desempenho ou reduções de custos do empreendimento;
- Investigar e solucionar problemas hidráulicos específicos, de difícil previsão, tais como problemas de: vórtice, cavitação, dissipação de energia, oscilações e perturbações de nível de água etc; e

- Contribuir na investigação de problemas observados após o início de funcionamento do protótipo.

Mesmo que se consiga um bom índice de padronização no projeto de diversas eclusas, ou se procure seguir arranjos e dimensões já ensaiados em modelo reduzido, a experiência tem mostrado que é sempre interessante realizar ensaios de verificação do desempenho a fim de se fazer os necessários ajustes (USSAMI *et al.*, 1983a).

Para que dois escoamentos sejam semelhantes é necessário que esses sejam geométrica, cinemática e dinamicamente semelhantes (TONDOWSKI, 1987).

A semelhança geométrica entre dois sistemas de escoamento existe quando a relação entre todas as dimensões lineares dos sistemas permanece igual, conforme a Equação 2.26:

$$\lambda_L = \frac{x_M}{x_P} = \frac{y_M}{y_P} = \frac{z_M}{z_P}. \quad 2.26$$

na qual: λ_L é a escala geométrica, x é o comprimento, y é a largura e z é a altura. Os índices M e P designam as grandezas do modelo físico reduzido e do protótipo, respectivamente.

A semelhança cinemática ocorre quando a relação entre as componentes da velocidade e da aceleração, em pontos homólogos de dois sistemas geometricamente semelhantes, permanece constante, conforme representado em 2.27:

$$\lambda_V = \frac{V_M}{V_P} = \frac{u_M}{u_P} = \frac{v_M}{v_P} = \frac{w_M}{w_P} \text{ e } \lambda_a = \frac{a^*_M}{a^*_P}, \quad 2.27$$

onde: λ_V é a escala das velocidades e λ_a é a escala de acelerações; V é a velocidade média e u , v e w são as componentes da velocidade nas direções x , y e z , respectivamente; a^* é a aceleração.

A semelhança dinâmica entre dois sistemas de escoamento, geométrica e cineticamente semelhantes, ocorre quando a relação entre as forças homólogas nos dois sistemas permanece constante. No caso de escoamentos de fluidos reais, as forças que atuam na porção elementar de fluido são as de pressão, as viscosas, as gravitacionais e as de capilaridade (tensões superficiais) (TONDOWSKI, 1987).

Os modelos físicos têm a mesma geometria de seu protótipo reduzida em escala segundo uma lei que rege a semelhança, a qual deve ser escolhida em função do escoamento. No caso das eclusas de navegação, são à superfície livre os escoamentos na tomada de água, nos poços das comportas, no interior da câmara e na restituição; e sob pressão nos aquedutos, nas derivações, nas comportas e nos orifícios.

Para o caso de escoamento à superfície livre a teoria da semelhança indica a adoção da lei de semelhança de Froude (Equação 2.28), tomando-se cuidado para que não haja influência das forças viscosas e da tensão superficial. Isso é conseguido por meio da imposição de um número de Reynolds limite e, também, evitando-se os ensaios com profundidades e cargas muito reduzidas (USSAMI *et al.*, 1983a).

$$\left[\frac{V_r}{\sqrt{gz_r}} \right]_{\text{modelo}} = \left[\frac{V_r}{\sqrt{gz_r}} \right]_{\text{protótipo}}, \quad 2.28$$

na qual:

$$\begin{aligned} V_r &= \text{velocidade de referência;} \\ g &= \text{aceleração da gravidade; e} \\ z_r &= \text{profundidade de referência.} \end{aligned}$$

Para o caso de escoamentos sob pressão a condição de semelhança é dada pela lei de semelhança de Euler, satisfazendo igualmente as condições quanto ao número de Reynolds. Dessa forma, tem-se (USSAMI *et al.*, 1983a):

$$\left[\frac{\Delta h}{V_r^2 / 2g} \right]_{\text{modelo}} = \left[\frac{\Delta h}{V_r^2 / 2g} \right]_{\text{protótipo}}, \quad 2.29$$

na qual:

Δh = diferença entre as cargas piezométricas medidas em duas seções distintas do aqueduto.

Sendo iguais no modelo e no protótipo a aceleração da gravidade, a viscosidade cinemática e o peso específico da água, resultam nas escalas de semelhança apresentadas na Tabela 2.1, na qual λ_L é a escala geométrica do modelo reduzido (USSAMI *et al.*, 1983a).

Tabela 2.1 - Escalas de semelhança entre modelo e protótipo.

Grandeza	Dimensão	Escala
Comprimento	[L]	λ_L
Massa	[M]	λ_L^3
Tempo	[T]	$\lambda_L^{1/2}$
Área	[L ²]	λ_L^2
Volume	[L ³]	λ_L^3
Velocidade	[LT ⁻¹]	$\lambda_L^{1/2}$
Vazão	[L ³ T ⁻²]	$\lambda_L^{5/2}$
Força	[MLT ⁻²]	λ_L^3

Fonte: USSAMI *et al.* (1983a).

Na apresenta-se Figura 2.37 uma imagem do modelo físico utilizado por Palauro (2012). O modelo físico foi construído em escala geométrica de 1:25 com base nos sistemas das Eclusas da Usina Tucuruí e no projeto da Eclusa da Usina Santo Antônio.



Figura 2.37 - Modelo físico utilizado por Palauro (2012).

(Fonte: PALAURO, 2012).

O índice de cavitação pode ser considerado o parâmetro básico de semelhança em escoamentos nos quais o fenômeno ocorra, mas não representa condição suficiente de semelhança dinâmica, visto que se baseia em duas hipóteses simplistas:

- Ocorre cavitação quando a pressão em algum ponto do escoamento atinge a pressão de vapor do líquido; e
- A pressão tem uma relação de semelhança com o quadrado da velocidade.

Essas duas afirmações são apontadas como responsáveis pela determinação de efeitos de escala nos estudos com base na igualdade de índices de cavitação (GIKAS, 1982).

A imposição da igualdade do índice de cavitação entre modelo e protótipo leva à Equação 2.30:

$$\left. \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \right|_{Modelo} = \left. \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \right|_{Pr\ ot\acute{o}tipo}, \quad 2.30$$

sendo o mesmo líquido à mesma temperatura, então:

$$\frac{P_{0Modelo} - P_V}{P_{0Pr\ ot\acute{o}tipo} - P_V} = \frac{(V_0^2)_{Modelo}}{(V_0^2)_{Pr\ ot\acute{o}tipo}}. \quad 2.31$$

A Equação 2.31 satisfaz tanto a igualdade de Froude quanto a igualdade de Reynolds, quando se consideram pressões efetivas. Dessa forma, além da igualdade dos índices de cavitação, deve-se escolher a lei de semelhança cabível a cada condição de escoamento (GIKAS, 1982).

É necessário ter em conta os vários fatores capazes de afetar o campo de pressões e influenciar a transposição para protótipos dos valores do índice de cavitação obtidos em instalações experimentais ou em modelos físicos (QUINTELA; RAMOS, 1980 e ARNDT, 1981):

- A semelhança geométrica não ser rigorosamente mantida, isto é, haver a possibilidade do aparecimento de desvios na forma e textura das superfícies que definem as fronteiras do escoamento;

- O escoamento estar separado e a pressão mínima não se registrar na fronteira;
- Os efeitos da turbulência que se traduzem em flutuações de pressão capazes de induzir cavitação mesmo quando a pressão média é bastante superior à crítica; e
- Os efeitos viscosos que alteram a relação pressão-velocidade.

O efeito de escala quanto ao regime de escoamento na modelagem de eclusas implica em diferentes valores de perdas de carga distribuídas no protótipo, pois o comportamento do protótipo é mais “liso”. Uma vez imposta a semelhança de Froude, a aplicação da semelhança de Reynolds implicaria no modelo o uso, pouco prático e custoso, de fluidos de baixa densidade, dada a relação $\lambda_v = \lambda_L^{3/2}$, na qual λ_v é a escala de viscosidades e λ_L é a escala geométrica (SANTOS, 1990).

O efeito de escala no escoamento, devido ao comportamento mais liso do protótipo, quanto à perda distribuída, é responsável pelas diferenças globais entre modelo e protótipo, podendo ou não ser importante face à influência de outros efeitos em parâmetros que se queira controlar ou em etapas de otimização de projeto. Por exemplo, em fase de análise do modelo reduzido hidráulico, o potencial de cavitação a jusante das comportas, determinado pelo índice de cavitação σ , é comparado com o σ_{lim} de critérios gerais formados por observação e experimentações práticas. Nessa fase, a avaliação da influência do efeito de escala pode ajudar em definições da forma hidráulica, como na cota de assentamento das comportas. Em fase posterior, na análise mecânica das comportas, poder-se-á, aproveitando-se as maiores dimensões do modelo, ou seja, menor efeito de escala em turbulência, definir o desenho do terminal das comportas cuja influência na vorticidade a jusante e em σ é ponderável (SANTOS, 1990).

2.5.2 MODELAGENS NUMÉRICAS

Os primeiros modelos numéricos descritos pela literatura tratam da simulação da operação de eclusas e da determinação de seus parâmetros hidráulicos calculados a partir da solução das equações de conservação de massa e movimento.

O LOCKSIM é um modelo numérico de escoamento que serve como uma ferramenta de avaliação para projetos de sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação. O modelo calcula a vazão e as cargas piezométricas no sistema resolvendo numericamente equações diferenciais parciais para um escoamento unidimensional não permanente (STOCKSTILL, 2002).

Stockstill (2003) comparou os resultados das investigações em modelo reduzido e das simulações numéricas realizadas, na época de projeto da eclusa, no modelo numérico unidirecional LOCKSIM para simulação do escoamento não permanente no sistema de enchimento e esvaziamento da Eclusa Whitten, com os dados da operação da eclusa e de resultados de simulações no modelo de escoamento tridimensional (ADH) na intenção de verificar se as características do escoamento correspondem às previstas na fase de projeto, tendo em vista que a eclusa estava registrando danos no teto dos condutos.

Os resultados das simulações tridimensionais demonstraram a distribuição de pressão no conduto, com regiões de incidência de pressões negativas significativas, sugerindo que a ocorrência de cavitação promove os danos no concreto. O estudo de Stockstill (2003) concluiu que as condições hidráulicas da eclusa são similares às determinadas na fase de projeto.

Ussami *et al.* (1983b) utilizaram o modelo SEEC-1, que descreve o escoamento transitório nos aquedutos, válvulas, curvas e difusores do sistema de enchimento e esgotamento de uma eclusa. As operações normais de enchimento e esvaziamento das eclusas são sempre em regime variável.

Com a evolução dos recursos computacionais, os modelos matemáticos de dinâmica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD) passaram a ser aplicados nas simulações de escoamentos sob comportas e em sistemas de eclusas de navegação. Com os modelos de CFD é possível a predição, entre outros, dos campos de velocidades e de pressão, e das propriedades turbulentas.

Kermani e Kavianpour (2007) realizaram uma investigação numérica para avaliar as forças hidrodinâmicas atuantes em comportas em condutos com alta pressão. Os autores testaram dois tipos de comporta: a plana e a segmento. O modelo numérico foi baseado nas equações tridimensionais de Navier-Stokes, considerando o modelo de turbulência k- ϵ . Os

resultados foram comparados com os dados do modelo físico do sistema de irrigação de Dasht-e-Abbas, no Iran, e demonstraram um bom ajuste.

A malha de cálculo utilizada foi não linear e tridimensional, conforme Figura 2.38. O tamanho dos elementos foi reduzido nas proximidades da comporta para aumentar a acurácia dos resultados. Para a abertura de 60% da comporta plana, o domínio consistia de 5.232 nós e 15.356 elementos. As condições de contorno foram a energia na entrada, a velocidade igual a zero na adjacência das paredes sólidas e a pressão na saída do conduto (KERMANI; KAVIANPOUR, 2007).

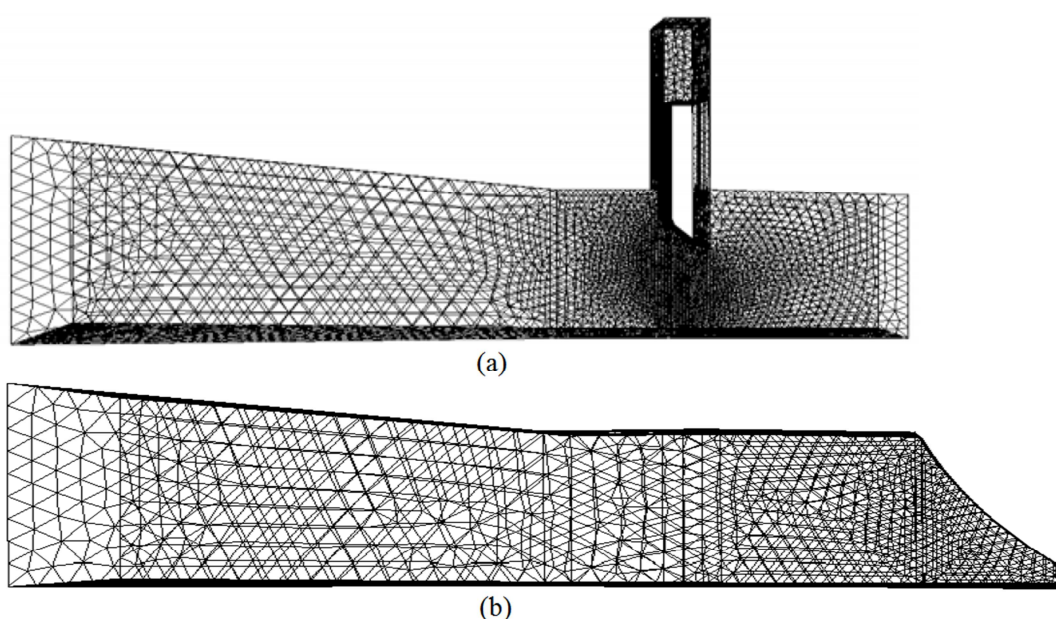


Figura 2.38 - Malhas de cálculo utilizadas no trabalho de Kermani e Kavianpour (2007).
(a) Para 60% de abertura da comporta plana. (b) Para 10% de abertura da comporta segmento.

(Fonte: KERMANI; KAVIANPOUR, 2007).

Andrade e Amorim (1997) realizaram uma análise numérica do escoamento e dos esforços hidrodinâmicos presentes durante o acionamento da comporta vagão da câmara de descarga da eclusa de Ibitinga. A solução numérica foi obtida resolvendo-se as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds em uma malha não-estruturada pelo método de elementos finitos.

Para a realização da modelagem numérica, Andrade e Amorim (1997) adotaram um domínio de cálculo bidimensional. Sua discretização foi feita utilizando-se elementos

quadrilaterais isoparamétricos de quatro nós, conforme apresentado na Figura 2.39. Nesses elementos foi utilizada uma aproximação bilinear para as componentes da velocidade e a pressão foi considerada constante em todo o elemento. A malha para execução do cálculo foi criada por um gerador automático do programa FIDAP a partir da discretização do contorno do domínio de cálculo, permitindo a concentração de nós nas regiões de forte gradiente.

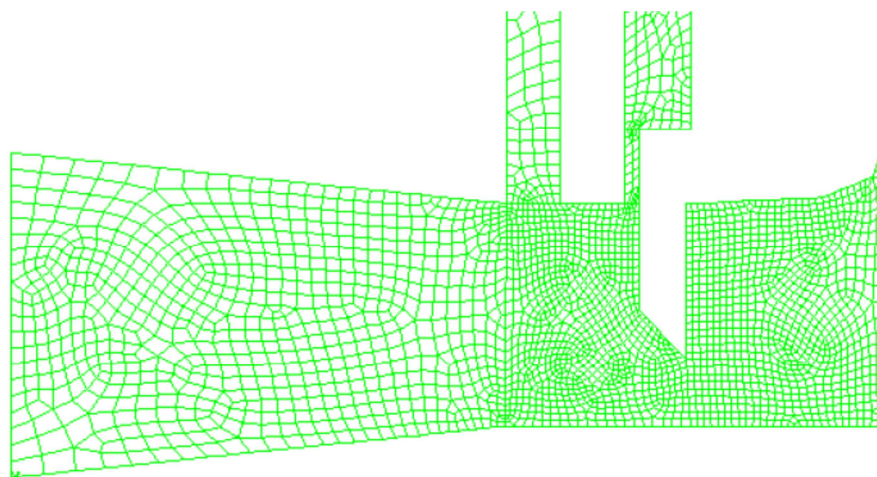


Figura 2.39 - Malha de cálculo de elementos quadrilaterais isoparamétricos de quatro nós utilizados no trabalho de Andrade e Amorim (1997).

(Fonte: ANDRADE; AMORIM, 1997).

Para descrever o comportamento turbulento do escoamento foi utilizado o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Como condição de contorno na seção de entrada foi imposto um perfil de velocidade constante obtido a partir dos valores das vazões medidas nos ensaios em modelos reduzidos. Na saída foi imposto um gradiente igual a zero para todos os graus de liberdade, com exceção da pressão que foi imposta como constante através da seção de saída (ANDRADE; AMORIM, 1997).

O modelo numérico utilizado por Andrade e Amorim (1997) envolveu um total de aproximadamente 150 horas homem no preparo dos dados e obtenção e análise dos resultados. O modelo numérico permitiu a execução de alterações na geometria com grande facilidade, tendo sido possível estudar outras configurações do escoamento e da comporta em um reduzido período de tempo.

A Figura 2.40 e a Figura 2.41 apresentam os resultados de pressão no conduto e na face da comporta obtidos por Andrade e Amorim (1997). Os autores concluíram pela viabilidade da utilização da modelagem numérica na previsão dos esforços hidrodinâmicos em comportas hidráulicas.

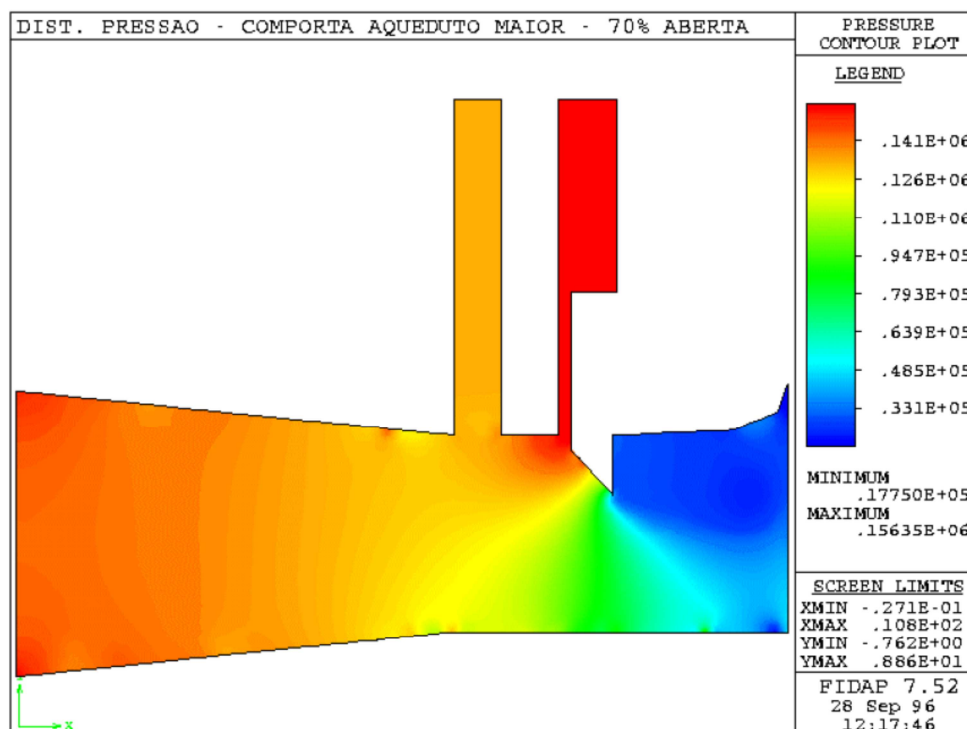


Figura 2.40 - Resultado das simulações numéricas para a distribuição de pressão com 70% de abertura da comporta.

(Fonte: ANDRADE; AMORIM, 1997).

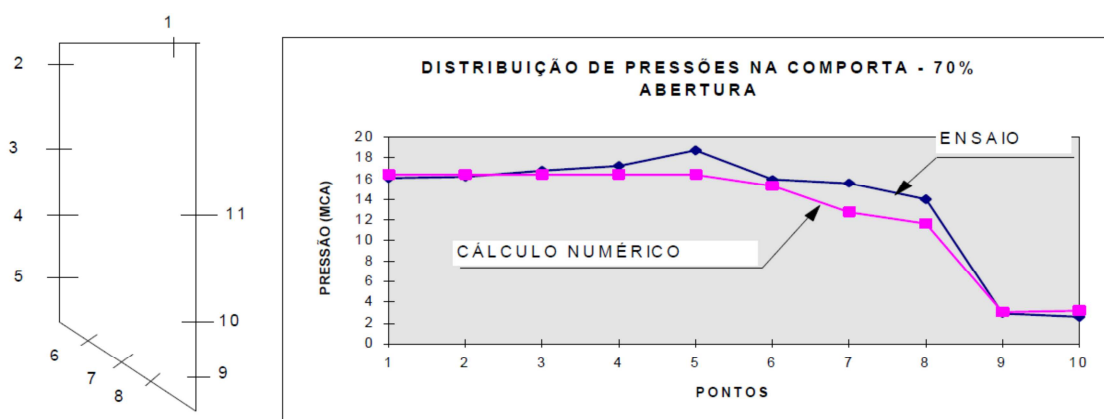


Figura 2.41 - Comparativo entre dados experimentais e os resultados das simulações numéricas para a distribuição de pressões sobre a comporta com 70% de abertura.

(Fonte: ANDRADE; AMORIM, 1997).

Hammack e Stockstill (2009) avaliaram numericamente o desempenho hidráulico das comportas do sistema de enchimento e esvaziamento da eclusa John Day, do Rio Columbia, a eclusa americana com a maior queda (33,5m) e que apresentou problemas desde o início de sua operação, em 1968.

A avaliação decorreu dos parâmetros hidráulicos obtidos em simulações tridimensionais para as aberturas da comporta segmento invertida iguais a 10%, 35%, 55%, 65%, 75% e 90%. A altura do conduto na seção da comporta era de 4,3m e o raio da comporta era de 5,8m. A malha de cálculo tridimensional foi construída usando elementos tetraédricos. Os elementos tinham lados variando entre 13mm (na superfície da comporta) e 0,76mm (distante da válvula). As malhas tinham entre 213.000 e 230.000 nós e entre 1,1 e 1,2 milhão de elementos tetraédricos.

Hammack e Stockstill (2009) utilizaram o módulo Navier-Stokes 3D do código numérico Adaptive Hydraulics (ADH) desenvolvido pelo U.S. Army Engineer Research and Development Center. O modelo utiliza as equações Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). As simulações foram realizadas em regime permanente para as condições apresentadas na Tabela 2.2 e as condições de contorno foram as pressões nas seções de entrada e saída do escoamento e a velocidade igual a zero junto às paredes do conduto. As pressões hidrostáticas corresponderam aos níveis 81,7m a montante e 47,2m a jusante da câmara da eclusa.

Tabela 2.2 - Condições das simulações realizadas por Hammack e Stockstill (2009).

Abertura da comporta	Vazão (m³/s)	Nível da água no poço da comporta (m)	Máxima velocidade (m/s)
10%	33,4	81,2	26,2
35%	112,5	78,5	29
55%	200,7	72,4	30,5
65%	248,2	67,5	31,1
75%	302,1	61	30,5
90%	387,1	47,4	29,3

Fonte: HAMMACK; STOCKSTILL (2009).

A Figura 2.42 e a Figura 2.43 apresentam, respectivamente, os campos de velocidade na direção x e as linhas de corrente para as condições simuladas por Hammack e Stockstill (2009). O valor da componente x da velocidade resultante das simulações variou de 30m/s no sentido principal do escoamento a 10m/s na direção inversa, na área de recirculação junto ao teto do conduto. No poço da comporta, a velocidade se aproxima de zero, exceto pela recirculação que se forma acima da comporta. A maior recirculação a jusante da comporta foi registrada para a abertura 55% (70m).

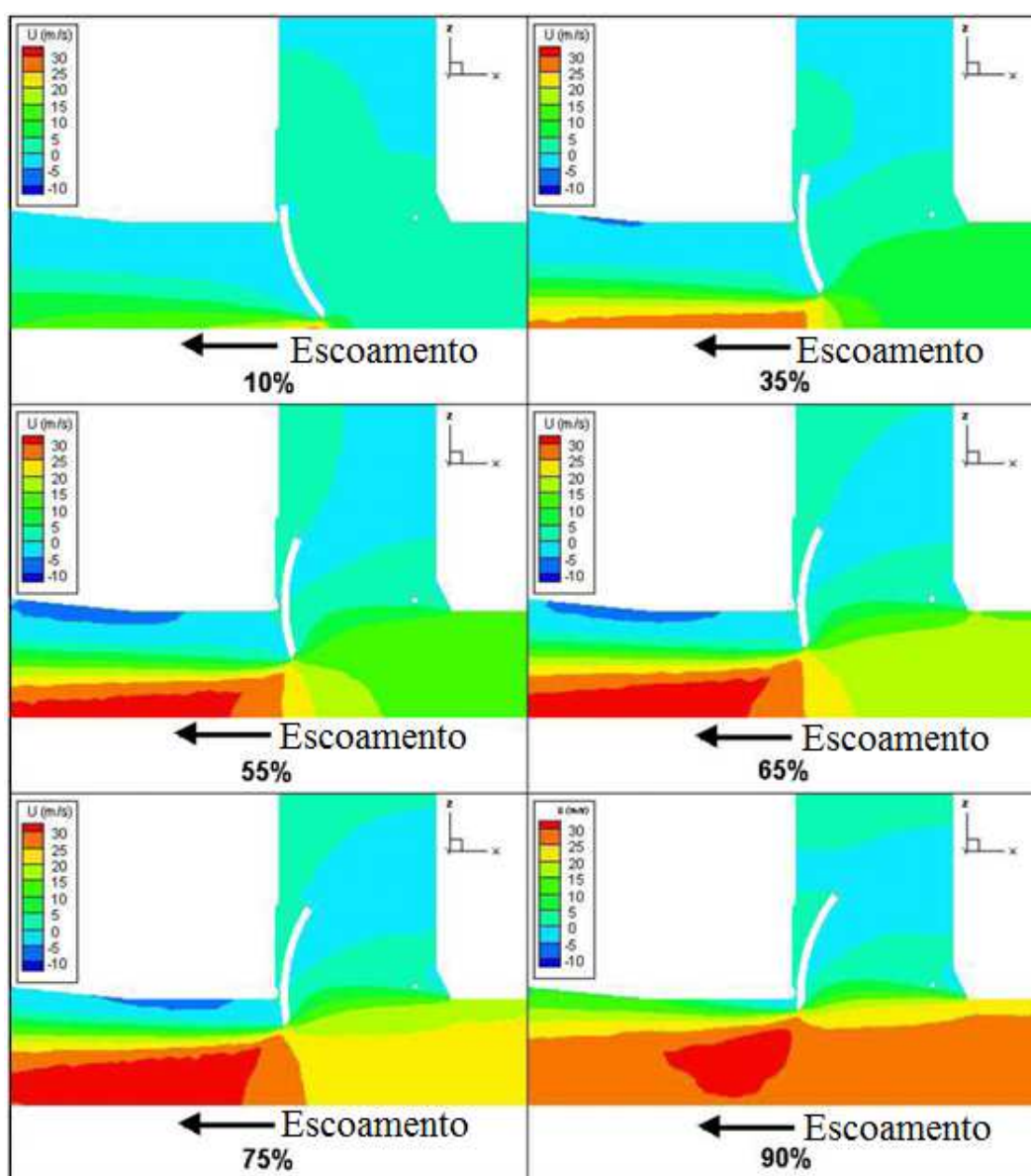


Figura 2.42 - Campos de velocidade na direção x resultantes das simulações de Hammack e Stockstill (2009).

(Fonte: HAMMACK; STOCKSTILL, 2009).

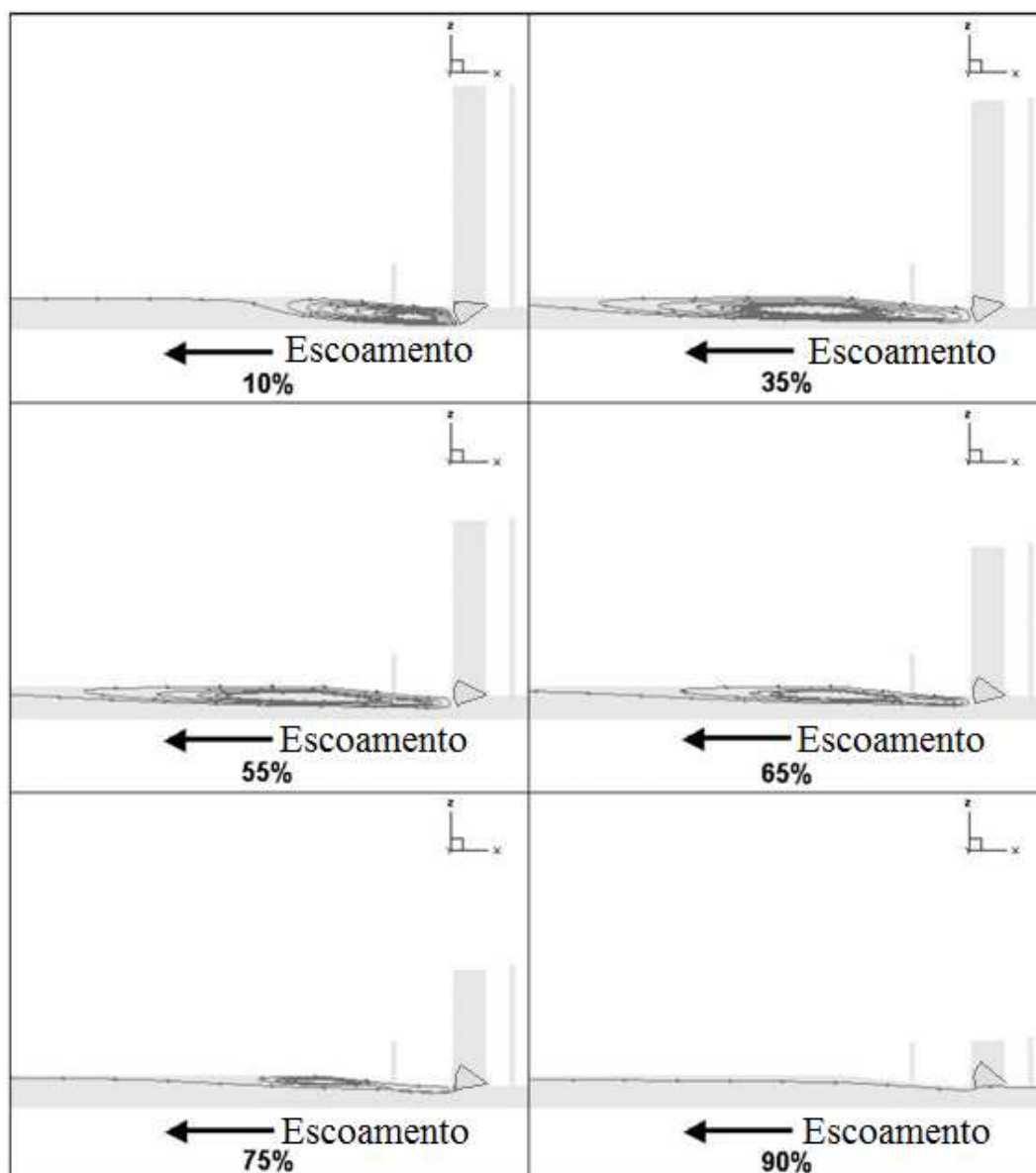


Figura 2.43 - Linhas de corrente resultantes das simulações de Hammack e Stockstill (2009).

(Fonte: HAMMACK; STOCKSTILL, 2009).

Hammack e Stockstill (2011) apresentaram as informações de campos de velocidade e linhas de corrente combinadas, conforme apresenta a Figura 2.44.

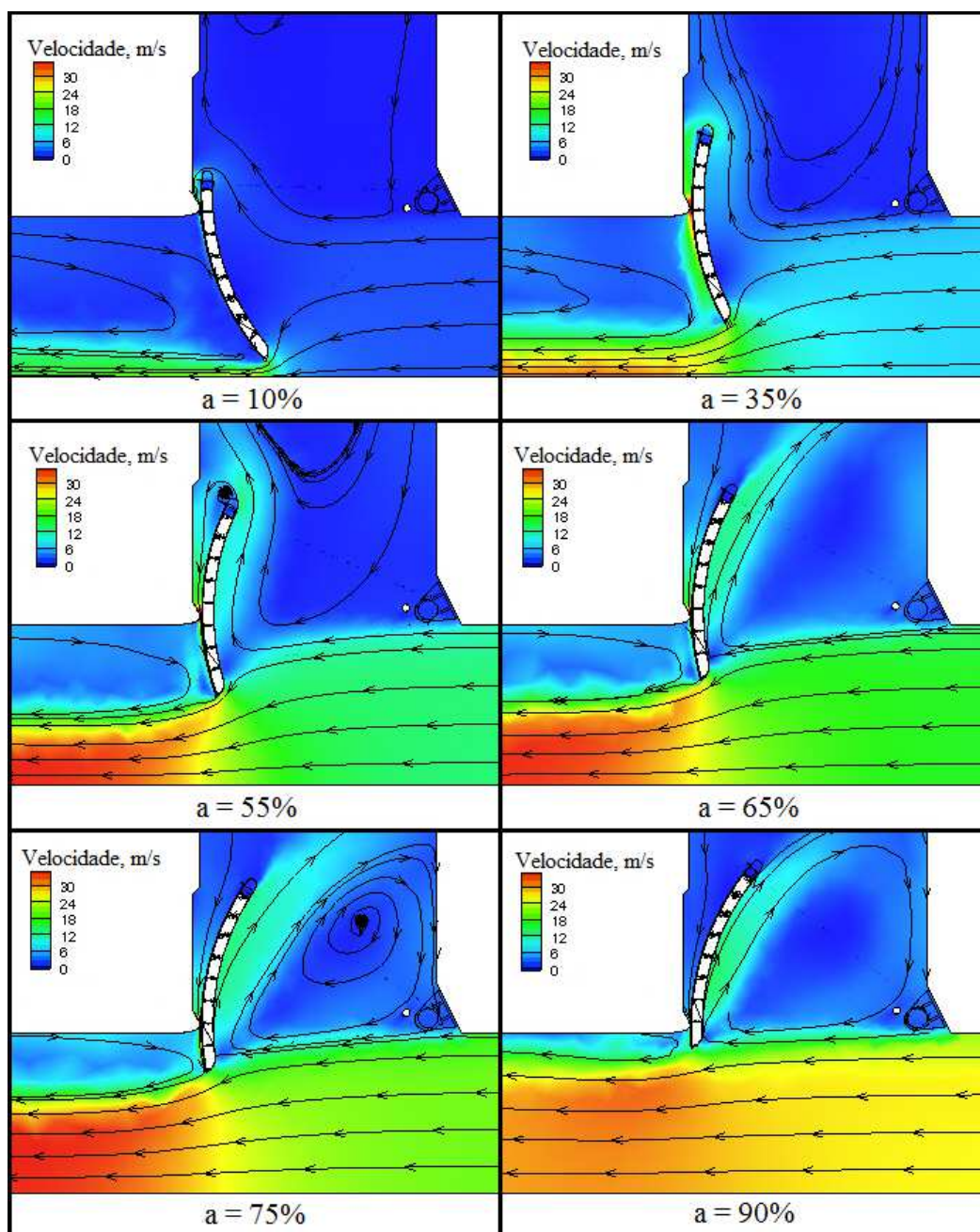


Figura 2.44 - Campos de velocidade na direção x combinados com as linhas de corrente resultantes das simulações de Hammack e Stockstill (2011).

(Fonte: HAMMACK; STOCKSTILL, 2011).

Os coeficientes de descarga e de perda de carga na comporta obtidos das simulações de Hammack e Stockstill (2011) estão apresentados na Tabela 2.3. Segundo os autores, os resultados se ajustaram bem aos encontrados por Pickering (1981) *apud* USACE (2006).

Tabela 2.3 - Coeficientes de descarga e de perda de carga na comporta obtidos das simulações de Hammack e Stockstill (2009).

Abertura da comporta	Coeficiente de descarga (C_d)	Coeficiente de perda de carga na comporta
10%	0,83	146,62
35%	0,80	12,30
55%	0,989	3,45
65%	1,089	2,02
75%	1,24	1,16
90%	1,09	1,04

Fonte: HAMMACK; STOCKSTILL (2009).

Segundo Hammack e Stockstill (2009), as principais vantagens da utilização dos processos computacionais aplicados em seu estudo foram o tempo e o custo requeridos, muito menores do que aqueles associados aos estudos de laboratório. Outra vantagem é que os resultados computacionais promovem informações contínuas do escoamento para o domínio de cálculo, enquanto as informações obtidas nos estudos de laboratório correspondem a pontos discretos.

Menéndez *et al.* (2010) simularam o escoamento para o sistema de enchimento e esvaziamento do terceiro conjunto de eclusas do Canal do Panamá utilizando uma aplicação de mecânica de fluidos computacional, via OpenFOAM®. Na solução foram aplicadas as equações RANS e o modelo de turbulência k-ε. O software resolve as equações diferenciais parciais utilizando o método dos volumes finitos em uma malha tridimensional não estruturada de células poliedrais.

As simulações foram realizadas para aberturas iguais a 80%, 50% e 20% da comporta plana. Os resultados obtidos por Menéndez, *et al.* (2010) para linhas de corrente e velocidades na direção x estão apresentadas na Figura 2.45.

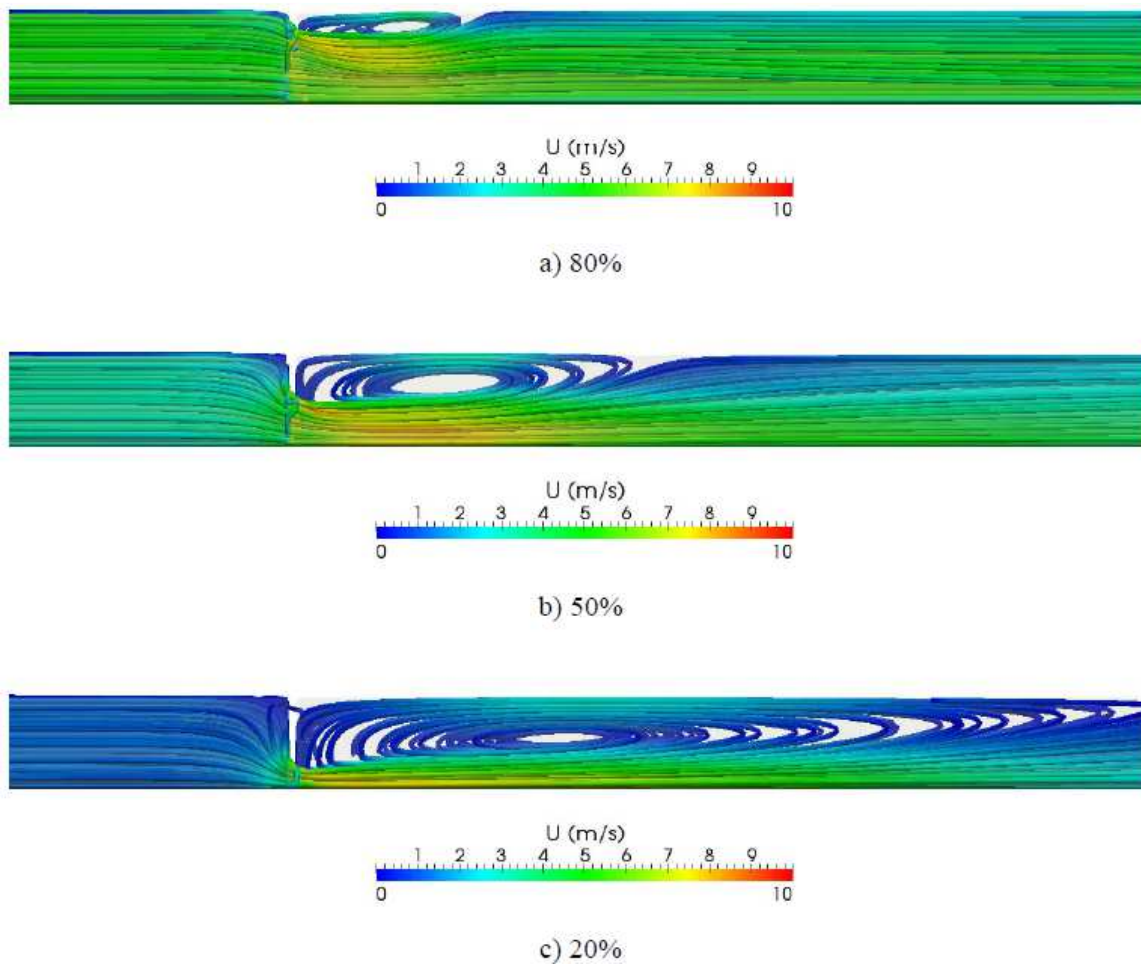


Figura 2.45 - Velocidades na direção x e linhas de corrente resultantes das simulações de Menéndez *et al.* (2010).

(Fonte: MENÉNDEZ *et al.*, 2010).

Capítulo III

3 METODOLOGIA

O objetivo principal desta pesquisa é analisar os parâmetros hidráulicos do escoamento a jusante de comportas de sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas, do tipo segmento invertida. Para tanto, foram conduzidas duas investigações complementares, a experimental e a numérica.

A investigação experimental proporcionou a geração de dados discretos de pressão média e instantânea ao longo do teto e da base do conduto para 53 condições de abertura e vazão, com escoamento em regime permanente. A investigação numérica, realizada com um software de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), viabilizou a geração de resultados do escoamento médio no interior do conduto para 12 condições de abertura e vazão, que reproduziam parte das simulações experimentais.

Na sequência, detalha-se a metodologia aplicada nas simulações.

3.1 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1.1 BANCADA DE ENSAIOS

A investigação experimental deste trabalho foi desenvolvida em uma bancada de ensaios instalada no Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS. Essa bancada consistia em um sistema hidráulico composto, basicamente, por reservatórios, canais, bombas, condutos, registros e comportas.

Entre o início do projeto da estrutura e o dia em que as bombas foram acionadas pela primeira vez, decorreu cerca de um ano e três meses.

Na seção principal da estrutura, conduto no qual foi realizada a medição das pressões, foi instalada uma comporta segmento invertida. O esquema da bancada de

ensaios pode ser visualizado na Figura 3.1 e na Figura 3.2. Na Figura 3.3 podem ser analisadas fotos da estrutura.

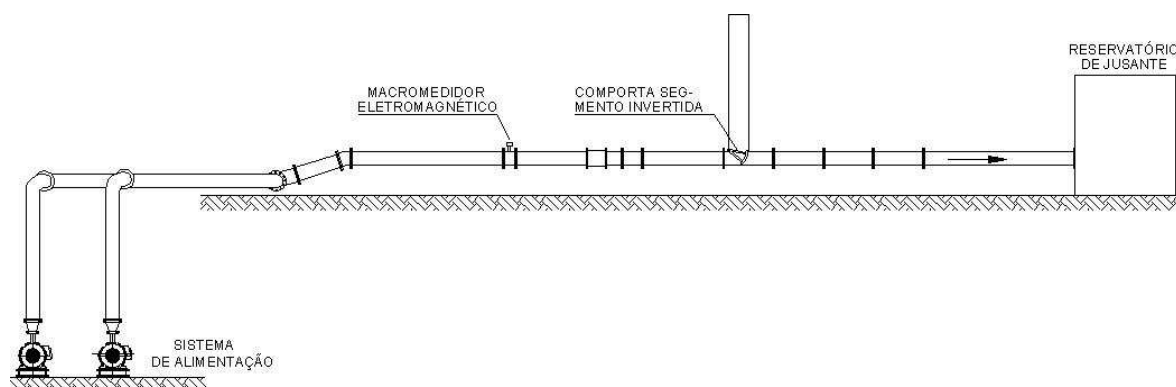


Figura 3.1 - Desenho esquemático da bancada de ensaios - Perfil.

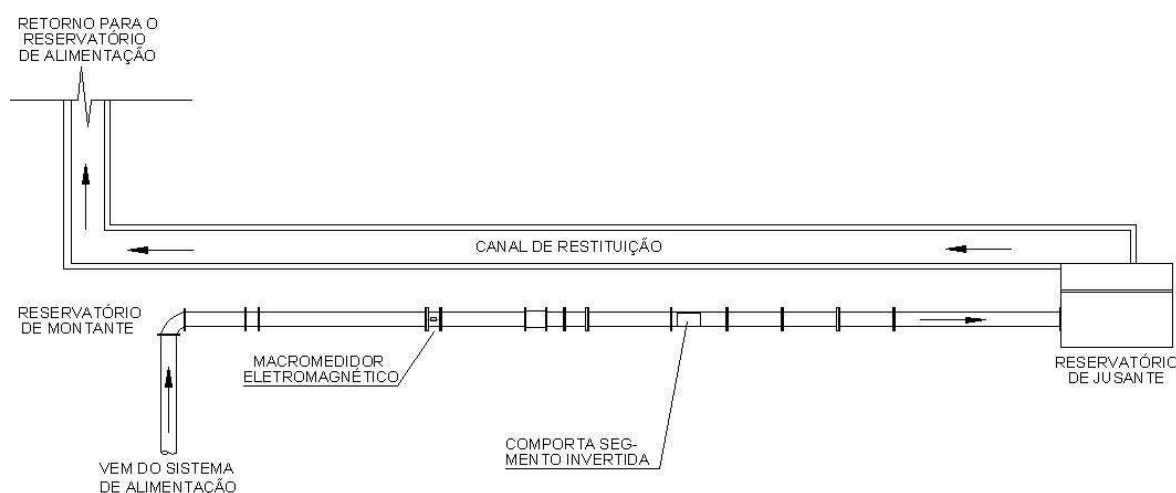


Figura 3.2 - Desenho esquemático da bancada de ensaios - Planta.

A bancada de ensaios era composta de (os números correspondem aos apresentados na Figura 3.3):

(1) Um sistema de alimentação, o qual possuía:

- Um reservatório pulmão de 600 m³, localizado no subsolo do laboratório;
- Tubulações e acessórios hidráulicos em ferro fundido;

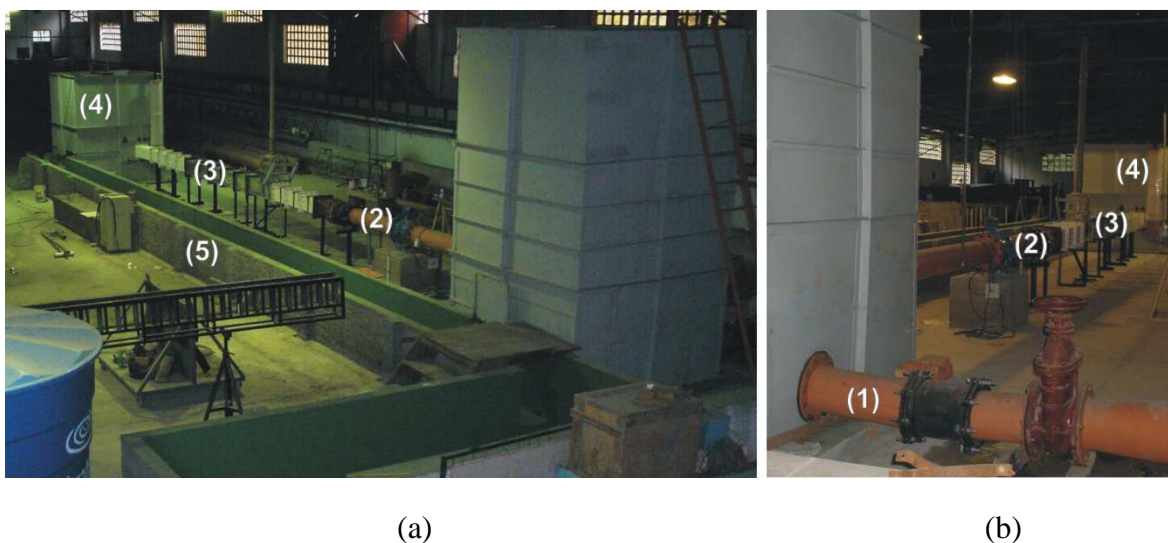


Figura 3.3 - (a) Vista do reservatório, condutos e canal de restituição. (b) Vista do reservatório, condutos e tubulação do sistema de alimentação.

- 2 bombas centrífugas responsáveis pelo recalque de água do reservatório pulmão à seção de ensaios. As bombas foram utilizadas de forma independente, ou em paralelo, e seu sistema de acionamento dispunha de conversores de frequência, o que permitiu a realização de ensaios com um maior número de vazões. As características das bombas são apresentadas na Tabela 3.1;

Tabela 3.1 - Características das bombas hidráulicas do sistema de alimentação.

Bomba	B1	B2
Marca	KSB	KSB
Modelo	ETA 150-33	ETA 250-29
Diâmetro do rotor	330 mm	280/170 mm
Velocidade específica	1160 rpm	1770 rpm
Potência do motor	25 cv	75 cv

- (2) Um conduto secundário em ferro fundido, a montante do conduto principal, no qual foi instalado o macromedidor eletromagnético de vazão. Esse conduto possuía seção transversal circular, diâmetro nominal de 250 mm e comprimento de 5,5 m.

Inicialmente, o sistema havia sido concebido de forma que o escoamento na seção de ensaios ocorresse entre dois reservatórios com níveis estabilizados. Como pode ser visualizado na Figura 3.3, ambos os reservatórios foram construídos. No entanto, o reservatório que funcionaria a montante da seção de ensaios apresentou dificuldades operacionais, devido ao seu tamanho e ao material aplicado em sua construção. Dessa forma, esse reservatório foi isolado do sistema e o conduto secundário passou a ser abastecido diretamente pelas bombas do sistema de alimentação;

- (3) Um conduto principal, no qual foi instalada a comporta segmento invertida e onde foram acompanhados os fenômenos de interesse desta pesquisa. Esse conduto foi construído parte em fibra de vidro, pois apresentava menor custo, e parte em acrílico, material utilizado na região da comporta e a jusante desta, onde a visualização do escoamento seria importante. O conduto principal possuía seção retangular de 25 cm x 25 cm e comprimento total de 8,9 m. A comporta foi construída em acrílico, com raio de 38 cm, e as vedações foram feitas com borracha. O escoamento no poço da comporta era à superfície livre;
- (4) Um reservatório de jusante, que recebia a água proveniente do conduto principal e que possuía um total de 7,2 m³, com altura de 2,4 m, e um vertedouro em seu interior, para manutenção de um nível de água constante a jusante do sistema durante a realização dos ensaios;
- (5) Um canal de restituição, que recebia a descarga do reservatório de jusante e a conduzia ao reservatório de alimentação.

Com a comporta completamente aberta e as duas bombas operando em paralelo, poderia ser atingida a vazão de 330 l/s no sistema. A bomba B1 foi utilizada nos ensaios com as menores vazões, enquanto a bomba B2 e as bombas B1 e B2 em paralelo foram utilizadas nos ensaios de maiores vazões. Durante a realização dos ensaios com a comporta parcialmente aberta, as limitações ao aumento das vazões foram o nível de água no poço da comporta, de 2,3 m, e a capacidade de suporte estrutural das peças de acrílico.

3.1.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Durante a execução dos ensaios, foram registradas a abertura da comporta, a vazão, os níveis no poço da comporta e no reservatório de jusante e as pressões médias e instantâneas ao longo do teto e da base do conduto. O projeto, a instalação e a calibração dos sistemas de aquisição de dados foram concluídos cerca de três meses após o início da operação da bancada de ensaios. Os sistemas de aquisição de dados são descritos a seguir.

A *abertura da comporta* foi registrada de forma visual com o auxílio de uma régua, conforme apresentado na Figura 3.4. A extremidade do terminal da comporta deveria ser coincidente com a linha correspondente à abertura programada para cada ensaio. As incertezas desse sistema de medição estão associados à precisão da impressão, do posicionamento da régua e da leitura do operador ao posicionar a comporta. A soma dessas incertezas foi estimada em ± 1 mm.

A *vazão* foi registrada por meio de um macromedidor eletromagnético de vazão instalado em trecho reto do conduto secundário, distante 3 m e 1,5 m das interferências mais próximas a montante e a jusante, respectivamente. O medidor, visualizado na Figura 3.5, era da marca Rosemount e possuía diâmetro de 250 mm, faixa de medição de 15,56 l/s a 465,28 l/s e vazão mínima medida de 0,62 l/s. A precisão na leitura era de $\pm 0,5\%$ do índice de 0,3 m/s a 10 m/s, abaixo de 0,3 m/s o sistema tinha precisão de $\pm 0,0015$ m/s. A saída analógica tinha a mesma precisão que a saída de frequência mais uma amplitude adicional de 0,05%. A capacidade de repetição era de $\pm 0,1\%$ da leitura e o tempo de resposta era de 0,2 s.

Durante os ensaios a vazão registrada pelo macromedidor eletromagnético variou em média 0,9 l/s. A mínima variação registrada foi de 0,2 l/s e ocorreu para as menores vazões de ensaio. A máxima variação registrada foi de 2,6 l/s e ocorreu para a máxima vazão de ensaio.

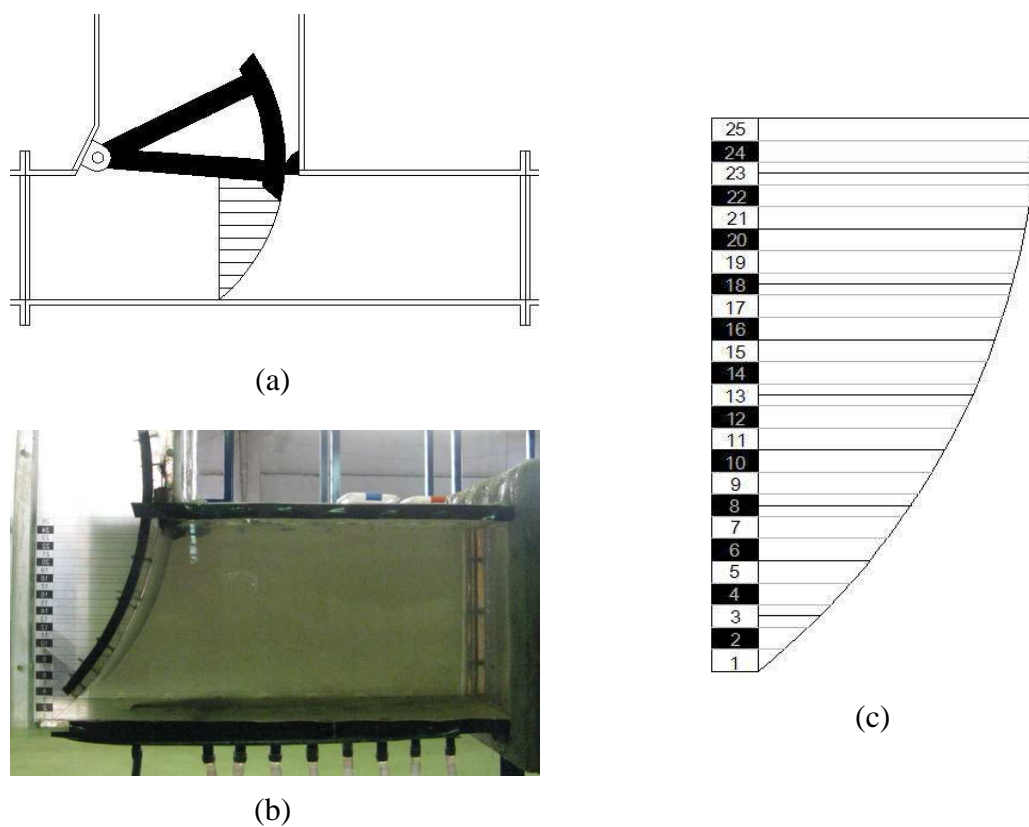
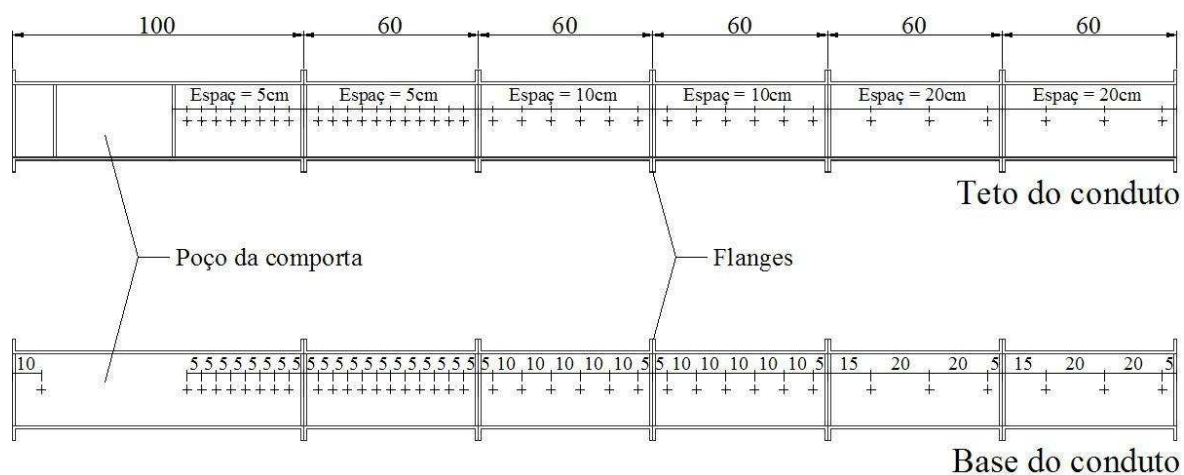


Figura 3.4 - Sistema de registro da abertura da comporta. (a) Esquema. (b) Foto. (c) Detalhe da graduação da régua.



Figura 3.5 - Macromedidor eletromagnético de vazão.

Para a instalação das tomadas de pressão, foram realizados furos no teto e na base do conduto principal, no trecho construído em acrílico, conforme os espaçamentos apresentados na Figura 3.6 e centralizados na largura. Os furos tinham diâmetro de 3 mm. Foram eliminadas saliências que pudessem interferir no escoamento na região dos furos.



Nota: Dimensões em centímetros.

Figura 3.6 - Posição dos furos para instalação das tomadas de pressão.

Após a instalação completa da estrutura, as distâncias entre os furos foram novamente verificadas, pois entre os flanges de cada peça foi inserida uma borracha para a vedação da estrutura. Internamente, a junção entre as peças teve acabamento com silicone, buscando-se a eliminação de saliências que causassem interferência no escoamento. As distâncias finais entre os furos onde foram instalados equipamentos de medição de pressão estão apresentadas na Tabela 3.2.

O número do furo corresponde ao número sequencial conforme contagem feita a partir da comporta. Os indicadores associados ao número do furo são M - montante, J - jusante, T - teto e B - base do conduto. Dessa forma, 33JT é a nomenclatura do 33º furo, ou tomada de pressão, a jusante da comporta no teto do conduto.

O furo 9JB não foi utilizado, pois nessa posição estava instalada uma peça estrutural de suporte do conduto.

Tabela 3.2 - Distâncias finais entre os furos onde foram instalados equipamentos de medição de pressão

Furo na Base	Posição em relação ao furo 1MB	Furo no Teto	Posição em relação ao furo 1MB	Distância em relação ao furo anterior (cm)
1MB	0			
1JB	50,8	1JT	50,8	50,8
2JB	55,8	2JT	55,8	5,0
3JB	60,8	3JT	60,8	5,0
4JB	65,8	4JT	65,8	5,0
5JB	70,8	5JT	70,8	5,0
6JB	75,8	6JT	75,8	5,0
7JB	80,8	7JT	80,8	5,0
8JB	85,8	8JT	85,8	5,0
9JB	-	9JT	97,0	11,2
10JB	102,0	10JT	102,0	5,0
11JB	107,0	11JT	107,0	5,0
13JB	117,0	13JT	117,0	10,0
15JB	127,0	15JT	127,0	10,0
17JB	137,0	17JT	137,0	10,0
19JB	147,0	19JT	147,0	10,0
21JB	167,2	21JT	167,2	20,2
22JB	177,2	22JT	177,2	10,0
25JB	207,2	25JT	207,2	30,0
27JB	227,6	27JT	227,6	20,4
29JB	247,6	29JT	247,6	20,0
31JB	267,6	31JT	267,6	20,0
33JB	308,6	33JT	308,6	41,0
35JB	348,6	35JT	348,6	40,0
37JB	388,6	37JT	388,6	40,0

As *pressões médias* foram registradas com a utilização de piezômetros. Como o nível de água dentro dos piezômetros era oscilante durante os ensaios, foram registrados os valores máximo e mínimo em cada piezômetro e em cada ensaio e foi obtido o valor médio

da pressão. O valor médio das oscilações foi de 0,0043 mca no teto e 0,0049 mca na base. Foram coincidentes os valores para o teto e para a base da variação máxima, 0,026 mca, da variação mínima, 0 mca, da mediana, 0,003 mca, e da moda, 0,001 mca.

As *pressões instantâneas* foram medidas por meio de transdutores de pressão instalados junto à base da tubulação imediatamente a montante da comporta e junto à base e ao teto da tubulação a jusante da comporta.

Os transdutores foram instalados contíguos à base do canal para minimizar a atenuação das pressões flutuantes, conforme o esquema de instalação apresentado na Figura 3.7. A distância entre a face interna do conduto e a membrana dos transdutores era de 3,5 cm (1 cm da chapa de acrílico e 2,5 cm da face do transdutor até a membrana) e esse valor foi aplicado na correção das medições feitas pelos transdutores para se ter o valor das pressões na face interna do conduto.

Os transdutores foram conectados a um conversor analógico digital de 12 bits, com duas placas, de 16 canais cada, ligadas a um microcomputador para a armazenagem dos dados, conforme Figura 3.8. Os dados registrados foram convertidos para valores de pressão, em metros de coluna de água (mca), de acordo com as equações de calibração de cada transdutor. De forma a amenizar os ruídos da rede elétrica, os equipamentos elétricos foram aterrados. As características dos transdutores de pressão utilizados estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características dos transdutores de pressão utilizados.

Número de equipamentos	Marca dos equipamentos	Faixa de operação (mca)		Precisão (%FE)
15	Sitron	-1,5	1,5	0,30
14	Sitron	-1,5	3,0	0,30
1	Hytronic	-2,1	4,9	0,25

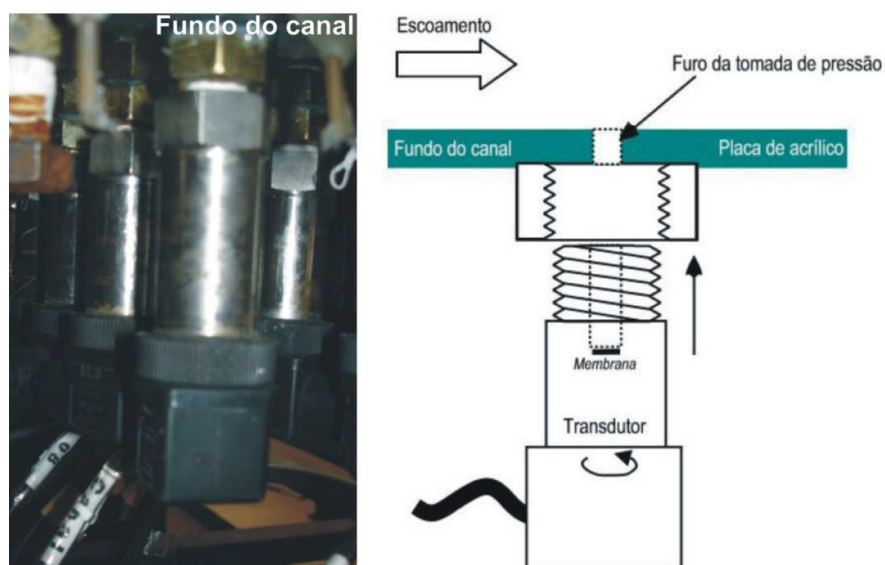


Figura 3.7 - Esquema de instalação dos transdutores de pressão.

(Fonte: MEES, 2007).



Figura 3.8 - Sistema de recepção e armazenagem de dados.

3.1.3 SIMULAÇÕES REALIZADAS

As simulações experimentais, ou ensaios, foram realizadas em regime permanente para diferentes graus de abertura da comporta e carga hidráulica de montante. Não foi permitida a entrada de ar na tubulação durante os ensaios. A cota do vertedouro do

reservatório de jusante foi estabelecida a partir da vazão mínima, de forma a garantir que a saída do conduto de jusante estivesse submersa em todos os ensaios. Contudo, o nível de jusante variou em função da vazão de cada ensaio. A Figura 3.9 apresenta um esquema das condições de ensaio.

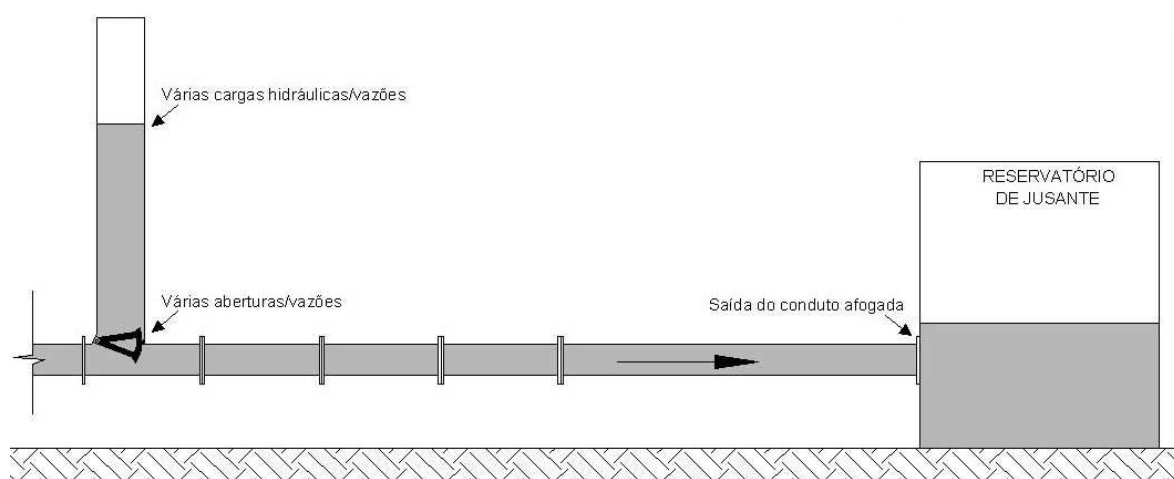


Figura 3.9 - Esquema das condições de ensaio.

Antes da realização de cada bateria de ensaios era feita a preparação da estrutura, processo que durava cerca de 2 h, exigia no mínimo dois operadores e tinha a seguinte sequência:

- Acionamento das bombas para enchimento da estrutura com a comporta totalmente aberta;
- Instalação dos equipamentos de medição de pressão, realizada com a estrutura cheia e operante:
 - Os piezômetros permaneciam sempre conectados à estrutura e, dessa forma, a preparação desses instrumentos consistia na eliminação do ar das mangueiras, especialmente dos conectados ao teto do conduto;
 - Para os transdutores da base do conduto, preenchia-se o espaço do orifício da membrana do equipamento com água e realizava-se a conexão do transdutor ao conduto de forma lenta, com água vazando pelo furo da estrutura, permitindo a instalação sem a existência de ar, o que podia ser verificado visualmente pela transparência do acrílico;

- Para facilitar a instalação dos transdutores no teto sem a presença de ar, o conduto era mantido operando sob baixa pressão, de forma que a água vazava pelos orifícios superiores preenchendo o volume formado pelas porcas de conexão dos transdutores ao conduto. Preenchia-se o espaço entre o orifício e a membrana do equipamento com água e realizava-se a conexão rápida do transdutor à tubulação. A existência de ar também era possível de ser verificada visualmente pelo acrílico, porém a inexistência de microbolhas de ar junto à membrana do transdutor era mais difícil de ser garantida do que nos transdutores da base do conduto;
- Para cada equipamento era ainda verificada a existência de vazamento e, caso encontrado, era providenciado o seu estancamento;
- Instalação do sistema de registro e armazenamento de dados; e
- Conexão elétrica entre os transdutores e o sistema de registro e armazenamento de dados.

Com a estrutura preparada, cada ensaio durava cerca de 30 min e era feito da seguinte forma:

- Ajuste da posição desejada para a comporta;
- Ajuste da vazão estabelecida para o ensaio. Como as leituras do macromedidor oscilavam, ajustava-se a vazão desejada como a média das leituras;
- Registro das leituras dos piezômetros;
- Realização das leituras com os transdutores de pressão; e
- Armazenagem dos dados registrados para posterior tratamento.

Da Figura 3.10 à Figura 3.19 podem ser visualizadas imagens dos ensaios.



Figura 3.10 - Eliminação de ar dos piezômetros.



Figura 3.11 - Piezômetros.



Figura 3.12 - Preenchimento com água do espaço do orifício da membrana do transdutor.



Figura 3.13 - Transdutores, piezômetro e furos não utilizados na base do conduto (parte elétrica protegida da água).



Figura 3.14 - Vista 1 da estrutura com os equipamentos de medição de pressão.



Figura 3.15 - Vista 2 da estrutura com os equipamentos de medição de pressão.



Figura 3.16 - Detalhe dos transdutores da base do conduto.



Figura 3.17 - Detalhe dos transdutores do teto do conduto.

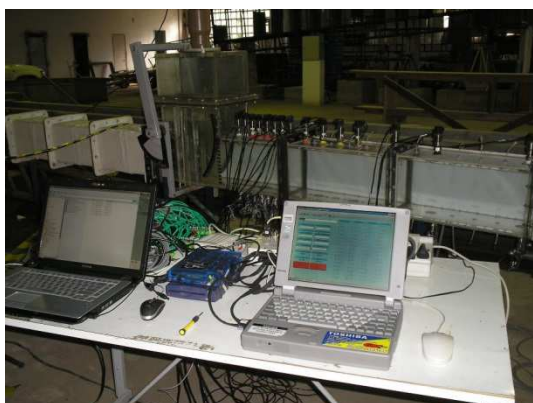


Figura 3.18 - Detalhe 1 dos transdutores conectados ao sistema de registro e armazenamento de dados.



Figura 3.19 - Detalhe 2 dos transdutores conectados ao sistema de registro e armazenamento de dados.

Os ensaios foram realizados em duas fases.

Na fase 1, foram desenvolvidos ensaios para a caracterização do comportamento hidráulico da estrutura e do escoamento, sendo registradas pressões médias por meio de piezômetros.

Primeiramente foram realizados 13 ensaios com a comporta completamente aberta para as vazões de 34 l/s, 45 l/s, 50 l/s, 60 l/s, 70 l/s, 79 l/s, 90 l/s, 100 l/s, 110 l/s, 120 l/s, 130 l/s, 140 l/s e 151 l/s, com o objetivo de determinar as perdas de carga no conduto principal. Foram verificadas as pressões médias imediatamente a montante da comporta e em pontos ao longo do conduto principal. A partir do diferencial de carga hidráulica e da aplicação da equação universal de perda de carga, foi possível determinar o coeficiente de

resistência ao escoamento (f) e verificar seu comportamento segundo o número de Reynolds (Re).

Na sequência, foram desenvolvidos os ensaios com a comporta parcialmente aberta, os quais permitiram a determinação do seu coeficiente de perda de carga localizada (k). Novamente, foram verificadas as pressões médias imediatamente a montante da comporta e em pontos ao longo do conduto principal para diversas vazões e aberturas. Verificando o diferencial de carga hidráulica, subtraindo as perdas de carga distribuídas e aplicando a equação geral de perda de carga localizada, foi possível determinar o valor de k . Os dados utilizados foram os dos furos 1MB e 37JB, este devido a ser o furo com maior distância da comporta e reduzir a probabilidade de ser subestimada a perda de carga provocada pela comporta. Na Tabela 3.4 são apresentadas as 22 condições simuladas na fase 1.

Tabela 3.4 - Ensaio com medição de pressão média e comporta parcialmente aberta.

a	Vazão (l/s)	a	Vazão (l/s)	a	Vazão (l/s)	a	Vazão (l/s)	a	Vazão (l/s)
80%	108	60%	75	40%	43	20%	37	10%	21
80%	130	60%	100	40%	56	20%	45	10%	24
80%	178	60%	128	40%	90	20%	52	10%	29
80%	75	60%	174	40%	100	20%	61	10%	32
		60%	44			20%	21		

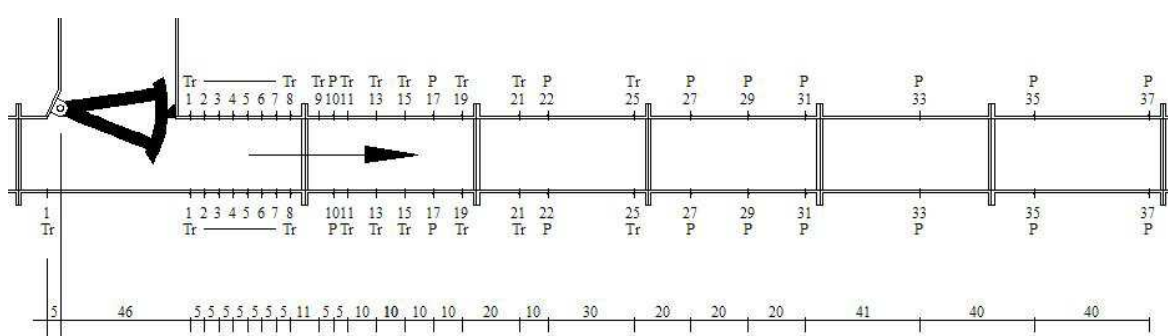
A partir da base bibliográfica deste trabalho e da análise dos dados dessa primeira fase de ensaios, foram escolhidos os pontos de medição de pressões médias e instantâneas e as condições das simulações a serem realizadas na fase seguinte. Além disso, os dados foram utilizados na especificação e compra dos transdutores de pressão.

A fase 2 correspondeu à investigação das pressões instantâneas, utilizando-se os transdutores de pressão.

Os ensaios da fase 2 foram iniciados com a repetição de algumas das condições da fase 1 que apresentaram as maiores solicitações. Durante essas repetições foram especificadas a frequência de 512 HZ e o tempo de aquisição de dados de 2 min para a realização dos ensaios, uma vez que esse tamanho amostral caracterizou os momentos

estatísticos das amostras de pressão, o que foi verificado a partir da comparação com dados obtidos em amostras separadas com as mesmas condições hidráulicas e com 4 minutos de duração e 512HZ de frequência, e com 8 minutos de duração e 256 HZ de frequência.

Realizaram-se, então, os ensaios para a medição simultânea de dados de pressões instantâneas nas posições e condições operacionais estabelecidas na fase anterior. Também foram registradas pressões médias, por meio de piezômetros, segundo a distribuição de equipamentos de medição apresentada na Figura 3.20.



Nota: Dimensões em centímetros; Tr = transdutor de pressão; P = piezômetro.

Figura 3.20 - Distribuição dos instrumentos de medição de pressão.

As pressões instantâneas foram medidas em um total de 30 pontos distribuídos ao longo do teto e da base do conduto. Próximo à comporta os transdutores de pressão foram posicionados com espaçamento de 5 cm entre eles e, conforme o aumento da distância a partir da comporta, o espaçamento entre os transdutores passou para 10 cm, 20 cm e 40 cm.

A simulações experimentais da fase 2 foram feitas para 53 condições de abertura e vazão, conforme apresenta a Tabela 3.5.

A vazão máxima para cada abertura foi limitada pela máxima carga hidráulica possível de se colocar a montante da comporta, de forma que não ocorresse o transbordamento de água pela câmara da comporta e não houvesse o comprometimento da estrutura e dos ensaios devido a vibrações. Já as vazões mínimas foram impostas pela mínima vazão necessária para manter o conduto escoando cheio, tendo em vista a existência de vazamentos na parede que formava o vertedouro de controle de nível de água no reservatório de jusante.

Tabela 3.5 - Ensaio com medição de pressão instantânea.

Abertura da comporta (a)		Vazão (Q)								
%	cm	l/s								
10	2,5	22	28	32						
30	7,5	22	28	32	40	60	90			
50	12,5	22	28	32	40	60	90	130	180	
60	15,0	22	28	32	40	60	90	130	180	220
70	17,5	22	28	32	40	60	90	130	180	220
80	20,0	22	28	32	40	60	90	130	180	220
100	25,0	22	28	32	40	60	90	130	180	220

3.2 INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA

3.2.1 FLOW 3D® (FLOW SCIENCE, 2005)

A investigação numérica realizada para geração de resultados do escoamento médio no interior do conduto a jusante da comporta segmento invertida foi realizada utilizando-se o software *FLOW-3D*®, versão 9.2.

O *FLOW-3D*® é um software comercial de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) comercial de propósito geral para a modelagem de escoamentos de fluidos e fenômenos de transferência de calor (FLOW SCIENCE, 2005). Ele possui uma interface gráfica de entrada de dados e estrutura, mas também faz a leitura de arquivos de entrada de dados. A Figura 3.21 apresenta uma tela do *FLOW-3D*®.

Tipicamente, um modelo numérico começa com uma malha de cálculo computacional, a qual é constituída por uma série de elementos interligados, ou células. Essas células subdividem o espaço físico em pequenos volumes com vários nós associados. Os nós são usados para armazenar valores das amostras, tais como temperatura, pressão e velocidade. A malha é efetivamente o domínio computacional que substitui e discretiza o original espaço físico. Uma vez que os parâmetros físicos reais variam continuamente no espaço, as malhas mais finas e com menor espaçamento entre os nós proporcionam uma melhor representação da realidade do que uma malha grosseira.

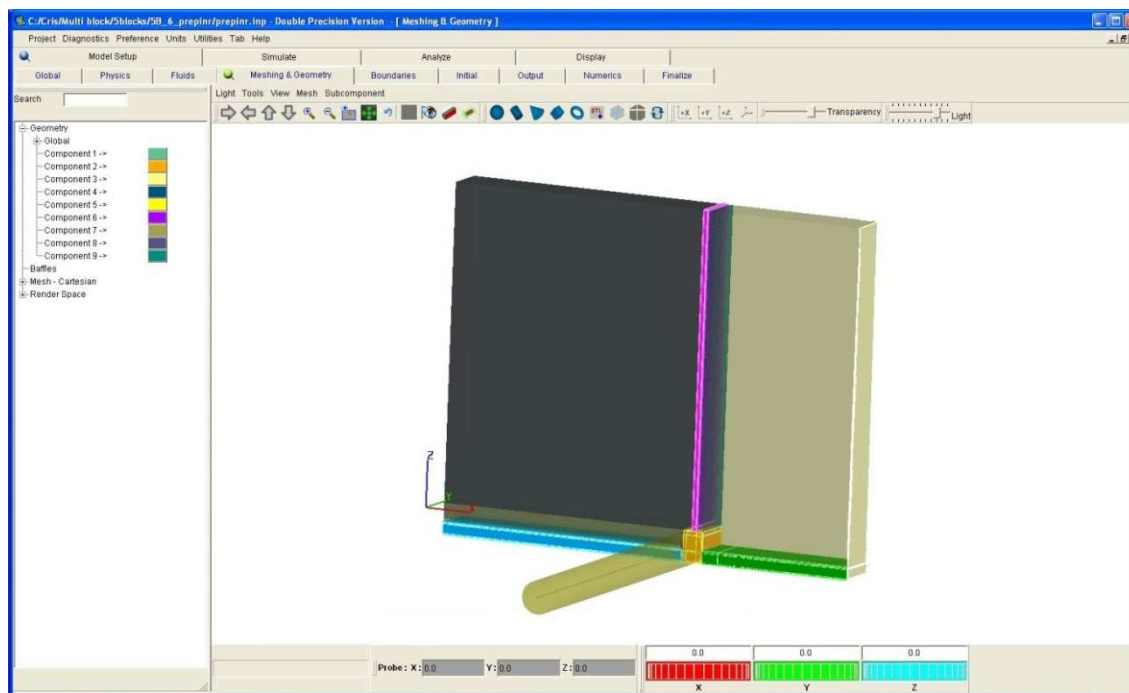


Figura 3.21 - Visualização de uma tela do *FLOW-3D*[®].

Malhas retangulares são fáceis de serem geradas e armazenadas, devido à sua natureza regular ou estruturada. As células computacionais do *FLOW-3D*[®] são numeradas de forma consecutiva por meio de três índices: i na direção x , j na direção y e k na direção z . Dessa maneira, cada célula de uma malha tridimensional pode ser identificada por um endereço único (i, j, k) , semelhante às coordenadas de um ponto no espaço físico.

Para a representação do escoamento turbulento tridimensional de um fluido Newtoniano incompressível, foram utilizadas, no *FLOW-3D*[®] as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (Equações Médias de Reynolds ou Reynolds-Averaged Navier-Stokes - RANS), na forma das equações de conservação de massa, Equação 3.1, e da equação da quantidade do movimento, Equação 3.2.

$$\frac{\partial(\overline{u_j} + u_j')}{\partial x_j} = 0, \quad 3.1$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \overline{u_j' \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2}, \quad 3.2$$

nas quais:

u	=	campo de velocidades;
\bar{u}	=	campo de velocidades médias;
u'	=	campo de flutuação de velocidades;
ρ	=	massa específica;
\bar{P}	=	pressão média; e
ν	=	viscosidade cinemática.

As equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (Equações Médias de Reynolds ou Reynolds-Averaged Navier-Stokes - RANS) são resolvidas pelos métodos dos volumes finitos e das diferenças finitas. Os mais antigos algoritmos numéricos com base nas “diferenças finitas” e métodos de “volumes finitos” foram originalmente desenvolvidos em malhas estruturadas. Esses métodos são o núcleo da abordagem numérica do FLOW-3D®.

O sistema de equações médias de Reynolds possui mais incógnitas do que equações. Para resolver o problema de fechamento o software tem os seguintes modelos de turbulência implantados: comprimento de mistura de Prandtl, uma equação, duas equações k- ϵ , RNG, além do modelo de simulações de grandes escalas (large eddy simulation - LES).

O escoamento à superfície livre é resolvido no *FLOW-3D*® pelo método chamado volume de fluido (VOF). A inércia do gás adjacente ao líquido é negligenciada e o volume ocupado pelo gás é substituído por um espaço vazio (vazio de massa) representado apenas por uma pressão uniforme e temperatura. Essa abordagem tem a vantagem de reduzir o esforço computacional já que, na maioria dos casos, os detalhes do movimento do gás não são importantes para o movimento do líquido (muito mais pesado).

Para a visualização dos resultados das simulações numéricas, foi utilizado o software Tecplot, versão 10.0.

3.2.2 SIMULAÇÕES REALIZADAS

O escoamento simulado no *FLOW-3D*® reproduziu algumas das condições simuladas experimentalmente no Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS.

O primeiro passo realizado foi a inserção da estrutura no modelo. Optou-se por uma simulação bidimensional, uma vez que os dados experimentais só estavam disponíveis ao longo do comprimento da estrutura. Assim, foram inseridos objetos sólidos para representar a comporta e as paredes do poço da comporta e do conduto. As paredes da estrutura correspondiam aos limites dos paralelepípedos e a comporta correspondia ao segmento do cilindro, elementos que podem ser visualizados em cinza na Figura 3.22.

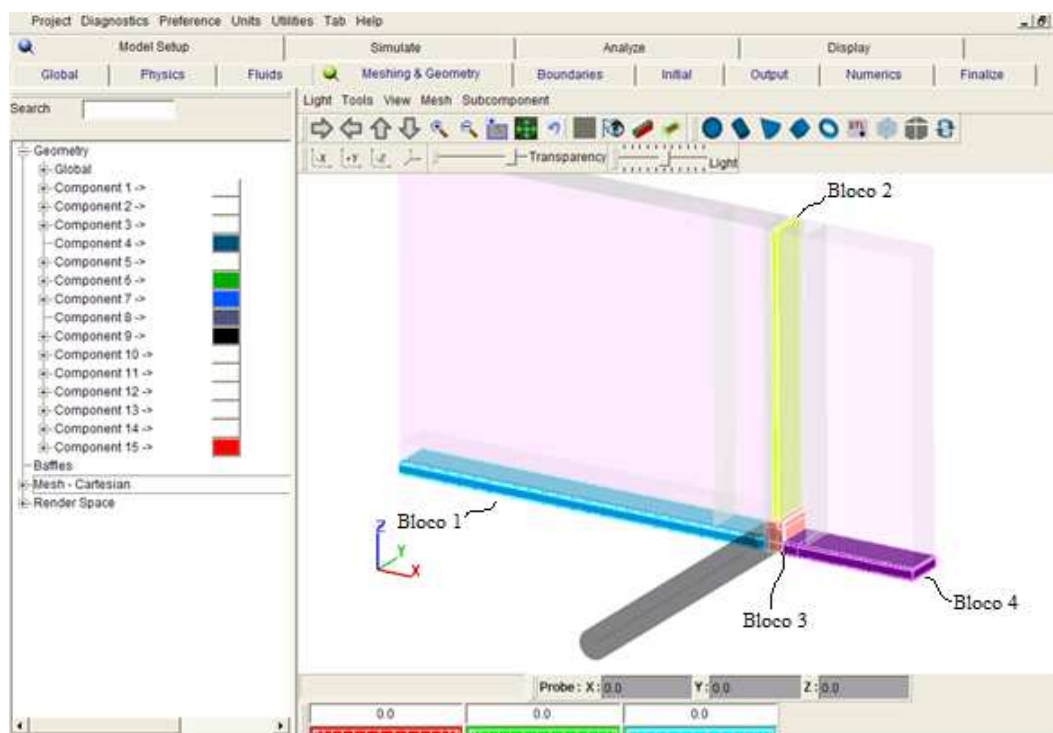


Figura 3.22 - Blocos de cálculo e objetos sólidos que representam a estrutura em estudos utilizados nas simulações no *FLOW-3D*[®].

As informações foram inseridas no *FLOW-3D*[®] por meio de arquivos de texto. A posição $x = 0$ nas simulações numéricas se manteve fixa e correspondente à parede de montante do poço da comporta. Utilizando a seguinte notação:

$xh(n)$ - limite superior em x do objeto n ,

$xl(n)$ - limite inferior em x do objeto n ,

$zh(n)$ - limite superior em z do objeto n ,

$zl(n)$ - limite inferior em z do objeto n ,

$rah(n) = d$ - cilindro de diâmetro d ,

$rotx(n) = a$ - rotação em a graus do objeto n com eixo de referência x ,

$trnx(n) = q$ - translação do objeto n em q na direção de x ,

$\text{angll}(n)$ e $\text{anglh}(n)$ são os ângulos inferior e superior de corte do cilindro,

$\text{rough}(n)$ = rugosidade do objeto n ,

a listagem abaixo apresenta o formato de inserção dos 15 objetos que compõem a estrutura em estudo (exemplo para o caso com 60% de abertura da comporta):

```

iob(1)=1, remark='Este é o conduto de ferro fundido de montante - teto',
xh(1)=-1.5, zl(1)=0.25,
rough(1)=4.69e-5,

iob(2)=2, remark='Este é o conduto de ferro fundido de montante - base',
xh(2)=-1.5, zh(2)=0.0,
rough(2)=4.69e-5,

iob(3)=3, remark='Este é o conduto de fibra de vidro de montante - teto',
xl(3)=-1.5, xh(3)=-0.15, zl(3)=0.25,
rough(3)=4.69e-5,

iob(4)=4, remark='Este é o conduto de fibra de vidro de montante - base',
xl(4)=-1.5, xh(4)=-0.15, zh(4)=0.0,
rough(4)=4.69e-5,

iob(5)=5, remark='Este é o conduto de acrílico de montante - teto',
xl(5)=-0.15, xh(5)=-0.05, zl(5)=0.25,
rough(5)=4.69e-5,

iob(6)=6, remark='Este é o conduto de acrílico - base - zona da comporta',
xl(6)=-0.15, xh(6)=1.0, zh(6)=0.0,
rough(6)=8.53e-4,

iob(7)=7, remark='Esta é a parte de acrílico chanfrada - atrás do eixo da
comporta',
xl(7)=-0.0515, xh(7)=0.0515, zl(7)=-0.0515, zh(7)=0.0515,
roty(7)=29.033, trnx(7)=-0.07, trnz(7)=0.32,
rough(7)=8.53e-4,

iob(8)=8, remark='Este é o eixo da comporta',
rah(8)=0.01, rotx(8)=90.0, trnx(8)=0.0045, trnz(8)=0.29,
rough(8)=4.69e-3,

iob(9)=9, remark='Este é a comporta',
ral(9)=0.3777, rah(9)=0.3877,
angll(9)=338.832, anglh(9)=37.754,
rotx(9)=90.0, trnx(9)=0.0045, trnz(9)=0.29,
rough(9)=4.69e-3,

iob(10)=10, remark='Os objetos 10, 11 e 12 formam o poço da comporta',
zl(10)=0.34, xh(10)=0.0,
rough(10)=8.53e-4,

iob(11)=11,
zl(11)=0.75, xh(11)=0.15,
rough(11)=8.53e-4,

iob(12)=12,
zl(12)=0.75, xl(12)=0.25, xh(12)=0.4,
rough(12)=8.53e-4,

iob(13)=13, remark='Este é o conduto de acrílico de jusante - teto -zona de
recirculação',
xl(13)=0.3920, xh(13)=1.0, zl(13)=0.25,
rough(13)=1.45e-4,

iob(14)=14, remark='Este é o conduto de acrílico de jusante - teto',
xl(14)=1.0, zl(14)=0.25,

```

```
rough(14)=8.53e-4,  
  
iob(15)=15, remark='Este é o conduto de acrílico de jusante - base',  
xl(15)=1.0, zh(15)=0.0,  
rough(15)=8.53e-4.
```

Os valores para a rugosidade dos objetos apresentados acima são os valores finais utilizados e são resultantes dos ajustes feitos nas simulações iniciais de validação do modelo numérico.

O *FLOW-3D*[®] permite a inserção de vários blocos dentro dos quais é especificada a malha de cálculo. Isso permite que sejam colocados blocos somente nas regiões de interesse, evitando o desperdício de tempo computacional na execução de cálculos em zonas sem escoamento. Para a estrutura em estudo foram utilizados quatro blocos: bloco 1 na região do conduto de montante (em azul na Figura 3.22), bloco 2 na região do poço da comporta (em amarelo na Figura 3.22), bloco 3 na região da comporta (em laranja na Figura 3.22) e bloco 4 na região do conduto de jusante (em roxo na Figura 3.22). O bloco 1 foi utilizado com 10 m de comprimento para o desenvolvimento do perfil de velocidades.

Como as simulações foram realizadas em duas dimensões, no eixo x têm-se as posições longitudinais do modelo e no eixo z as alturas. A largura, no eixo y, foi admitida igual à unidade, 1 m neste caso, como pode ser observado na Figura 3.22.

Para resolver o problema de fechamento das equações médias de Reynolds foi adotado o modelo de turbulência k- ϵ .

As condições de contorno aplicadas foram:

- Um perfil de velocidades retangular na entrada do bloco 1;
- Uma energia cinética turbulenta na entrada do bloco 1 para representar a turbulência existente no escoamento de montante e ajustar o perfil de velocidades numérico ao experimental; e
- Uma pressão no final do bloco 4, correspondente à pressão registrada na tomada de pressão 37JB para cada condição simulada.

Como condição inicial foram informadas a pressão a montante da comporta, a pressão no final do bloco 4 e a velocidade média do escoamento para cada condição.

Dentro de cada bloco foi inserida uma malha de cálculo que era dividida em células. Quanto menores as células, maior a precisão do cálculo e maior o tempo necessário para a execução das simulações em um mesmo domínio.

Para cada escoamento existe um tamanho de célula a partir do qual não ocorrem significativas diferenças nos resultados, ou seja, o resultado passa a ser independente do tamanho das células. Dessa forma, as simulações iniciais foram realizadas com uma malha grosseira que foi sendo refinada até ser encontrado o ponto em que não fossem mais registradas alterações significativas nos resultados.

Foram testadas as malhas com células de 25 x 25 mm e de 10 x 10 mm com refinamento de 5 x 5 mm na região da comporta e do eixo da comporta, pois essas estruturas não eram bem representadas por células menores. Também foi testada uma malha com células de 5 x 5 mm. A comparação entre os resultados de pressão e de velocidade na direção x não demonstraram variações nos resultados. As comparações dos parâmetros energia cinética turbulenta e dissipação de energia cinética turbulenta podem ser visualizadas na Figura 3.23 e na Figura 3.24, respectivamente. A diferença mais significativa está na taxa de dissipação de energia cinética turbulenta junto às paredes. Dessa forma, optou-se por uma malha com detalhamento nas áreas de interesse.

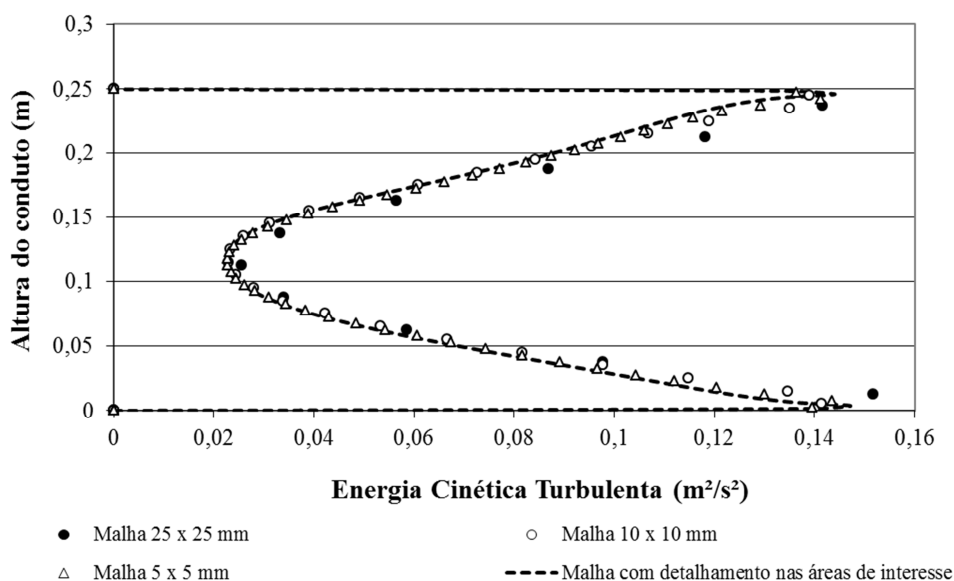


Figura 3.23 - Avaliação do tamanho das células da malha de cálculo – Comportamento da energia cinética turbulenta na seção x = 2,51 m (jusante da comporta).

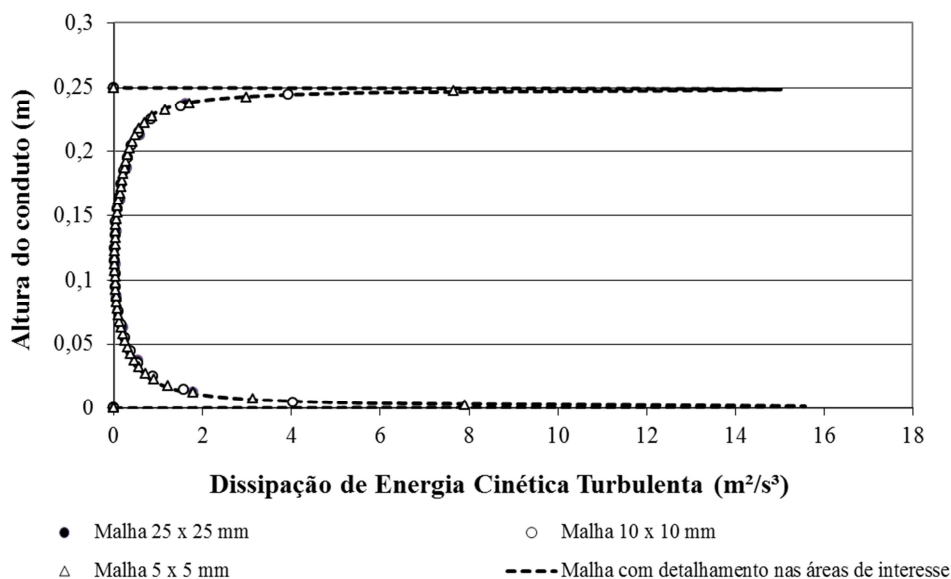


Figura 3.24 - Avaliação do tamanho das células da malha de cálculo – Comportamento da dissipação de energia cinética turbulenta na seção $x = 2,51$ m (jusante da comporta).

Para a malha adotada, o tamanho das células variou exponencialmente de 2,5 mm próximo às paredes do conduto até 5 mm no centro do conduto na direção z . Na direção x , as células possuíam 30 mm no conduto de montante, 5 mm na região da comporta e até 1 m a jusante dela, e variavam exponencialmente de 5 mm até 25 mm até o final do conduto (final do bloco 4). Foram 52.755 células no total. Um detalhe da malha de cálculo na região da comporta pode ser visualizado na Figura 3.25.

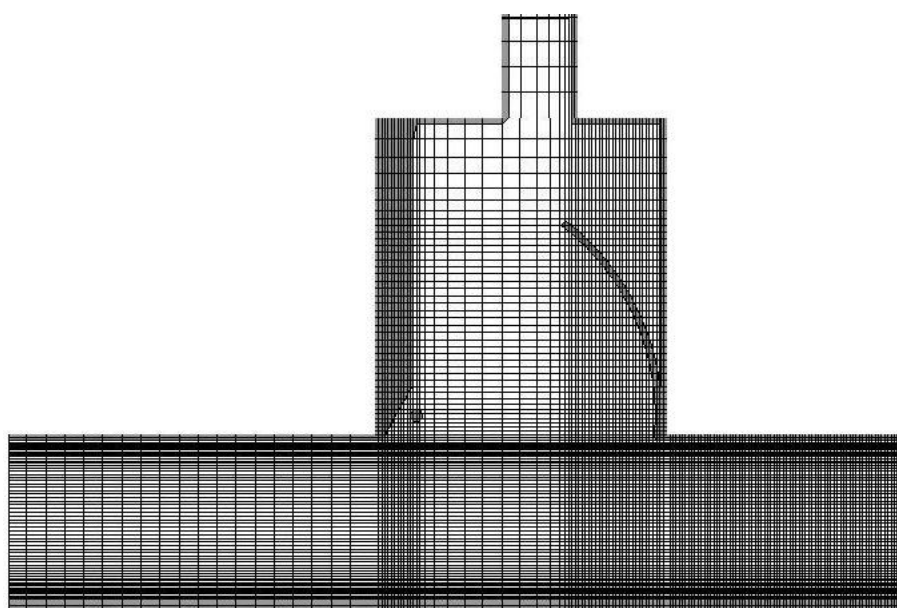


Figura 3.25 - Detalhe da malha de cálculo utilizada nas simulações numéricas.

Foram realizadas simulações experimentais para a medição, com um tubo de Pitot, de pontos para traçar o perfil de velocidades médias na direção x a montante da comporta e auxiliar na validação do modelo numérico. Foram feitas medições para a máxima vazão simulada para cada abertura da comporta. A partir dessas medições calculou-se a vazão específica (q), em m^2/s , gerada a partir de cada perfil de velocidades, conforme Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Vazões específicas calculadas a partir dos perfis de velocidade experimentais.

<i>Abertura da comporta (%)</i>	<i>Vazão (Q) (l/s)</i>	<i>Velocidade média a partir de Q (m/s)</i>	<i>Vazão específica (q) (m²/s)</i>	<i>Velocidade média a partir de q (m/s)</i>
100	220	3,52	0,9592	3,837
60	220	3,52	0,922	3,69
50	180	2,88	0,743	2,97
60	90	1,44	0,357	1,43
30	90	1,44	0,357	1,43
10	32	0,512	0,095	0,38

A velocidade média obtida a partir da vazão específica foi superior à velocidade média do escoamento para as vazões de 220 l/s e 180 l/s, inferior para a vazão de 32 l/s e similar para a vazão de 90 l/s, com a diferença de apenas 0,01 m/s. Verifica-se que para as condições com 100% e 60% de abertura da comporta, a vazão de 220 l/s produziu vazões específicas diferentes na seção central da tubulação.

Com a utilização da velocidade média obtida a partir da vazão específica como velocidade média na direção x do perfil retangular aplicado como condição de contorno na entrada do bloco 1, os resultados de pressão ao longo do teto e da base do conduto apresentaram melhor ajuste em algumas simulações. No entanto, isso não ocorreu para todos os casos. Dessa forma, o valor da velocidade média na entrada do bloco 1 foi escolhido segundo o melhor ajuste dos resultados numéricos aos dados experimentais de pressão.

A comparação entre os perfis de velocidade média na direção x contribuíram para a escolha do valor de energia cinética turbulenta (TKE) inserida como condição de contorno de montante. Foram testados valores 0,00 m^2/s^2 , 0,08 m^2/s^2 , 0,1239 m^2/s^2 e 2,00 m^2/s^2 ,

conforme Figura 3.26. Foi adotado o valor de energia cinética turbulenta igual a $0,1239 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

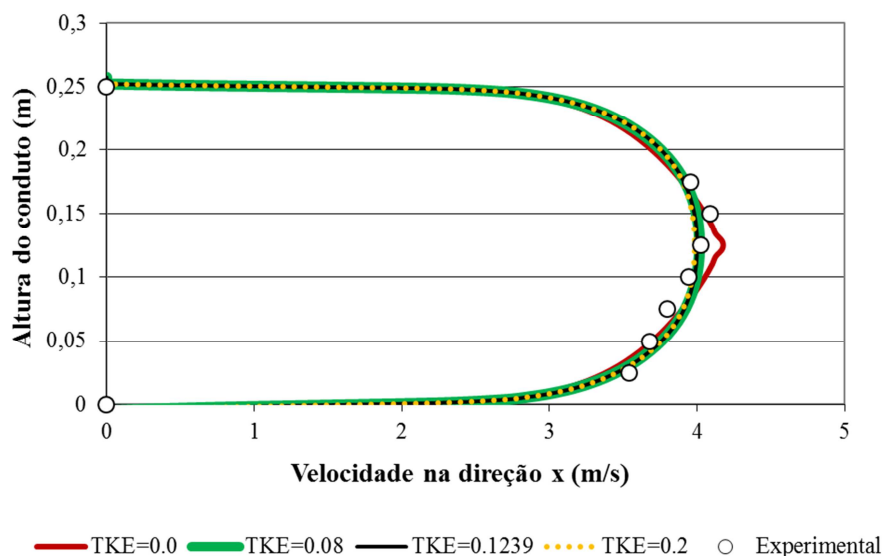


Figura 3.26 - Perfil de velocidade média na direção x para a condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s – Comparação de valores de energia cinética turbulenta (TKE) como condição de contorno de montante.

Foram realizadas 80 simulações a fim de se conhecer o modelo, ajustar a malha de cálculo e ajustar os parâmetros das simulações. As primeiras simulações duravam 48 h de processamento. A partir do momento em que uma simulação de uma determinada condição era concluída, as demais simulações, para a mesma condição, iniciavam seus cálculos a partir dos resultados da primeira, o que acelerava a convergência das iterações e reduzia o tempo de processamento para cerca de 24 h.

Chegaram a ser utilizados 5 computadores simultaneamente para a realização das simulações numéricas. No entanto, para as simulações finais, foram utilizados dois computadores com as características apresentadas na Tabela 3.7.

Após a validação do modelo foram realizadas as simulações numéricas para 12 das 53 condições experimentais, conforme a Tabela 3.8, na qual também são apresentadas as condições iniciais e as condições de contorno utilizadas.

Tabela 3.7 - Características dos computadores utilizados nas simulações numéricas.

Computador	Processador	Memória RAM	Memória de HD	Sistema operacional
1	Intel Core Duo T2350 1.86GHz	2GB	500GB	Windows XP 32 bits
2	Intel Core i7 920 S1366 2.66GHZ	4GB (2x2GB)	500GB	Windows XP 32 bits

Tabela 3.8 - Condições iniciais e de contorno das simulações numéricas.

Condição de referência		Simulação	Condições iniciais			Condições de contorno		
a	Q		Nome de referência	Velocidade média no conduto	Nível de água no poço da comporta (1MB)	Pressão no final do bloco 4 (37JB)	Velocidade na entrada do bloco 1	TKE na entrada do bloco 1
%	(l/s)		(m/s)	(m)	(mca)	(m/s)	(m ² /s ²)	(mca)
10	32	62_prepinr_4 B_A10Q32	0,553	2,234	0,400	0,553	0,1239	0,400
30	90	60_prepinr_4 B_A30Q90	1,430	2,170	0,473	1,430	0,1239	0,473
50	180	58_prepinr_4 B_A50Q180	2,970	2,262	0,650	2,970	0,1239	0,650
60	28	B3_prepinr_4 B_A60Q28	0,448	0,439	0,398	0,448	0,1239	0,398
60	32	B2_prepinr_4 B_A60Q32	0,553	0,450	0,410	0,553	0,1239	0,410
60	40	B1_prepinr_4 B_A60Q40	0,640	0,470	0,410	0,640	0,1239	0,410
60	60	B2_prepinr_4 B_A60Q60	0,960	0,540	0,440	0,960	0,1239	0,440
60	90	B4_prepinr_4 B_A60Q90	1,440	0,690	0,480	1,440	0,1239	0,480
60	130	B5_prepinr_4 B_A60Q130	2,180	0,980	0,547	2,180	0,1239	0,547
60	180	B5_prepinr_4 B_A60Q180	2,880	1,462	0,640	2,880	0,1239	0,640
60	220	B3_prepinr_4 B_A60Q220	3,690	1,962	0,770	3,690	0,1239	0,770
100	220	44_prepinr_4 B_A100Q220	3,840	0,937	0,750	3,840	0,1239	0,750

Observação: As simulações com 70% e 80% de abertura da comporta não convergiram.

Como velocidade média do perfil retangular aplicado como condição de contorno na entrada do bloco 1, em 5 simulações foi aplicado o valor de velocidade média decorrente da vazão de referência do conduto, em 4 simulações foi aplicada a velocidade média decorrente da vazão específica na seção central do conduto e apenas para as vazões 32 l/s e 130 l/s foi feita a estimativa do valor da velocidade média para o melhor ajuste dos resultados numéricos aos dados experimentais de pressão.

No Apêndice apresenta-se um exemplo de arquivo de entrada de dados *no Flow-3D®* e as explicações para a sua leitura.

Capítulo IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COEFICIENTES HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO

4.1.1 COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LINEAR E TIPO DE ESCOAMENTO

Os dados de pressão média registrados nas simulações experimentais realizadas com a comporta completamente aberta foram utilizados para o cálculo do coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach (f) da estrutura em estudo. A diferença de pressão entre as leituras dos piezômetros instalados nas tomadas de pressão 1JB, 25JB e 37JB do conduto de acrílico, sem interferências que gerassem perdas de carga localizadas, foi considerada como a perda de carga linear (h_f). Com a aplicação da fórmula universal de perda de carga, Equação 4.1, calculou-se o coeficiente de atrito f de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}, \quad 4.1$$

na qual:

h_f = perda de carga linear;

f = coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach;

L = comprimento;

V = velocidade média do escoamento;

g = aceleração da gravidade; e

D = diâmetro do conduto.

Os valores encontrados para f apresentaram uma tendência de redução com o aumento do valor do número de Reynolds (Re), conforme pode ser visualizado na Figura 4.1. Esse comportamento seria esperado, uma vez que os valores da relação $\frac{Re\sqrt{f}}{D/k^*}$, na qual k^* é a rugosidade equivalente, se mantiveram abaixo de 200, o que indica um regime de escoamento turbulento liso. No entanto, a dispersão dos dados supera a tendência de variação de f com Re , assim, decidiu-se pela adoção de um valor constante e igual à média dos valores encontrados para f , qual seja 0,015.

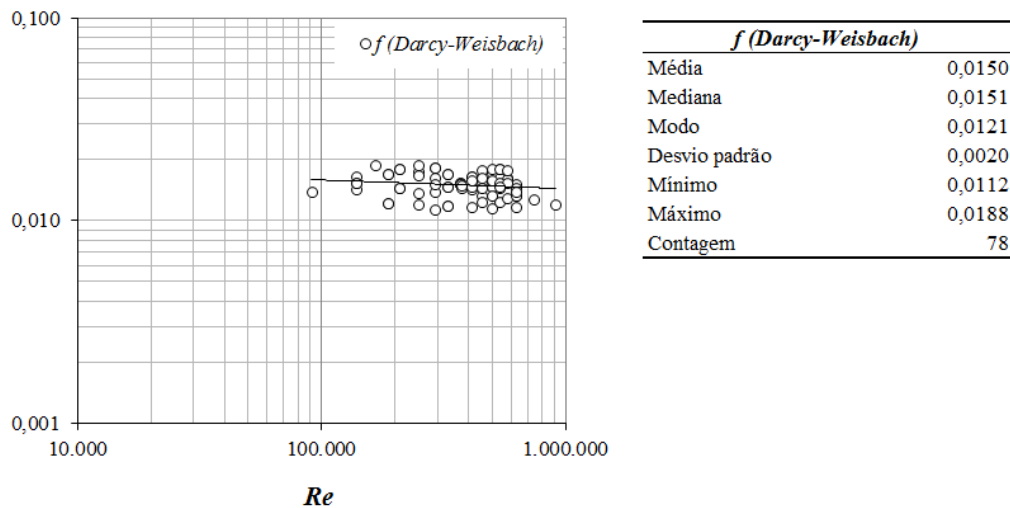


Figura 4.1 - Coeficiente f do conduto de acrílico - seção principal de ensaios.

Para auxiliar na definição dos valores de rugosidade a serem inseridos nas simulações numéricas no *Flow-3D*®, também foi calculado o coeficiente n , que depende da rugosidade das paredes e é aplicado na fórmula de Manning, Equação 4.2. Os valores de n variaram entre $0,0075 \text{ s/m}^{1/3}$ e $0,0098 \text{ s/m}^{1/3}$, sendo o valor médio igual a $0,0087 \text{ s/m}^{1/3}$.

$$Q = \frac{1}{n} \left(\frac{A^*}{P^*} \right)^{2/3} A^* \sqrt{\frac{hf}{L}}, \quad 4.2$$

na qual:

Q = vazão;

A^* = área molhada; e

P^* = perímetro molhado.

4.1.2 COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA DEVIDA À COMPORTA

Determinado o coeficiente de perda de carga linear, foi possível a determinação do coeficiente de perda de carga localizada na comporta ($k_{Comporta}$) pela diferença de pressão entre montante e jusante da comporta (tomadas de pressão 1MB e 37JB), subtração da perda de carga linear e aplicação da Equação 2.4. A tomada 37JB foi escolhida por ser a de maior distância e, portanto, o escoamento com a menor influência da comporta. Os

resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.2 de forma comparada com os dados de USACE (1977), com os quais apresentaram aderência.

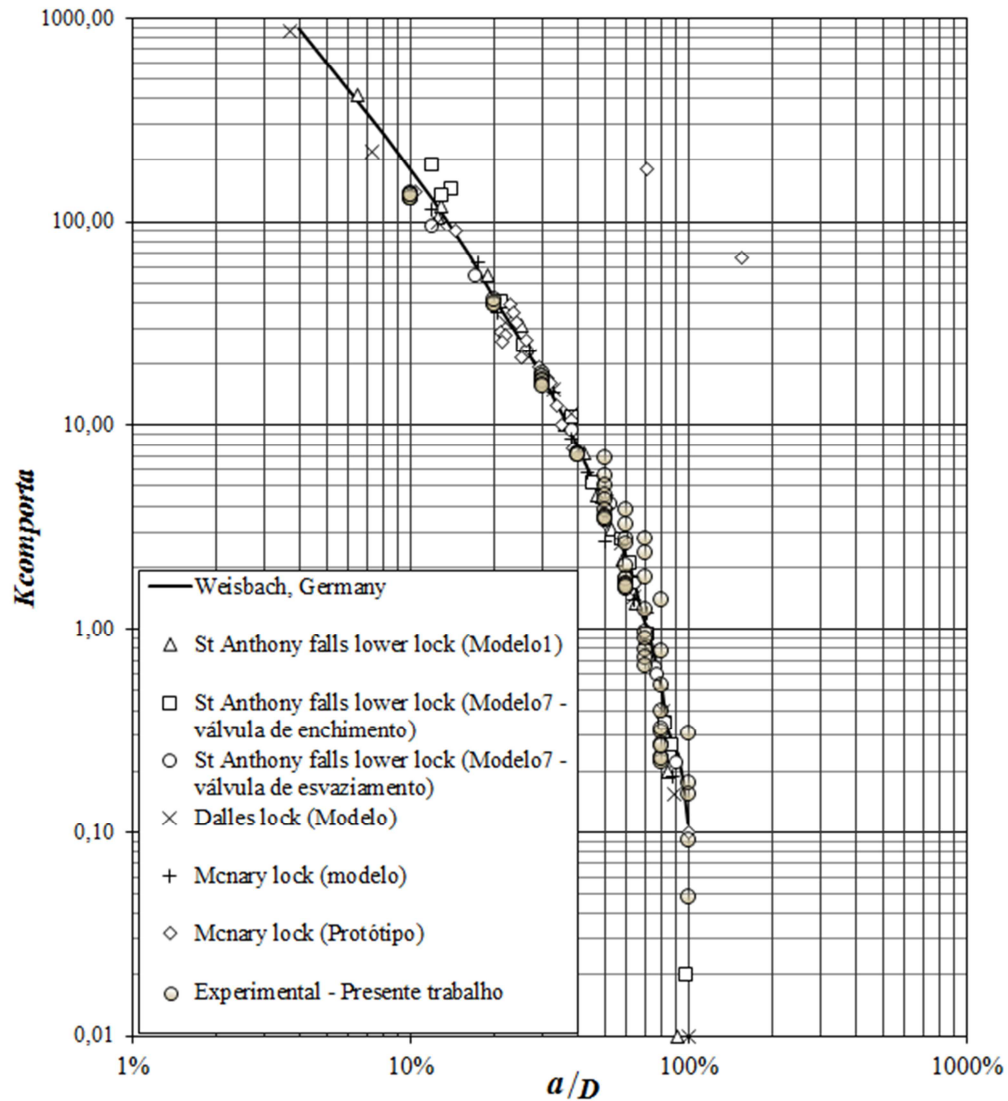


Figura 4.2 - Coeficiente de perda de carga na comporta segmento invertida – comparação com os dados de USACE (1977).

4.1.3 COEFICIENTE DE CONTRAÇÃO DO ESCOAMENTO

Coeficiente de contração (C_c) não foi medido no modelo físico. Contudo, a partir dos resultados das simulações numéricas foi possível a determinação desse coeficiente. Para as simulações com 60% de abertura da comporta, realizadas para várias vazões, o

valor de C_c se manteve constante e igual a 0,77. Os demais valores encontrados para C_c foram: 0,85 para 10% da abertura da comporta, 0,81 para 30% e 0,79 para 50%. Na Figura 4.3 pode-se visualizar que a tendência dos valores encontrados a partir dos resultados das simulações numéricas deste trabalho possuem concordância com a tendência dos dados do protótipo de Barkley, no entanto, esses valores foram superiores aos casos registrados experimentalmente e publicados por USACE (2011).

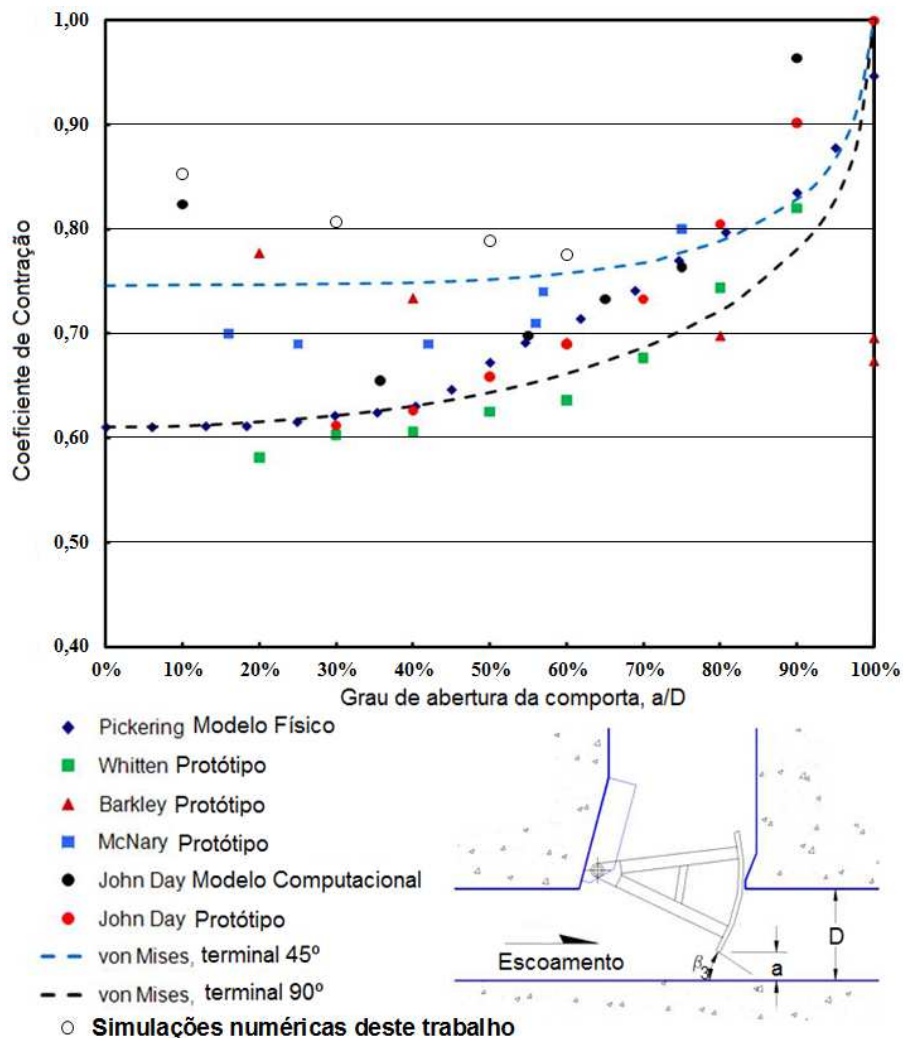


Figura 4.3 - Coeficiente de contração para a comporta segmento invertida – comparação com os dados de USACE (2011).

4.2 PRESSÕES MÉDIAS JUNTO À BASE E AO TETO DO CONDUTO

As pressões médias registradas nas simulações experimentais nos pontos centrais da base e do teto ao longo do conduto a jusante da comporta segmento invertida apresentaram-se de forma distinta em função da vazão de ensaio e da abertura da comporta.

Os dados registrados de pressão média nesses pontos podem ser visualizados, em metros de coluna de água (mca), por abertura da comporta, da Figura 4.4 à Figura 4.17, e por vazão, da Figura 4.18 à Figura 4.35.

Nos dados da Figura 4.4 à Figura 4.17, é possível verificar o aumento da pressão média nas tomadas de pressão mais distantes da comporta em função do aumento da vazão. Essa elevação decorre da elevação do nível de água no interior do reservatório de jusante que ocorreu com o aumento da vazão, pois o vertedouro em seu interior não teve a cota da crista alterada entre os ensaios.

Os dados de pressão média para a tomada 35JT, furo do teto do conduto correspondente a 2,98 m a partir do terminal da comporta, tiveram a tendência de apresentar valores superiores aos das tomadas imediatamente anterior e posterior, fato que fica mais claro quanto maiores as vazões dos ensaios. Como não foram encontrados problemas com o piezômetro instalado, acredita-se que a falha tenha ocorrido na tomada, onde uma saliência estaria direcionando alguma quantidade de fluxo para a mangueira do piezômetro e, conseqüentemente, aumentando o registro da pressão conforme o aumento da vazão de ensaio.

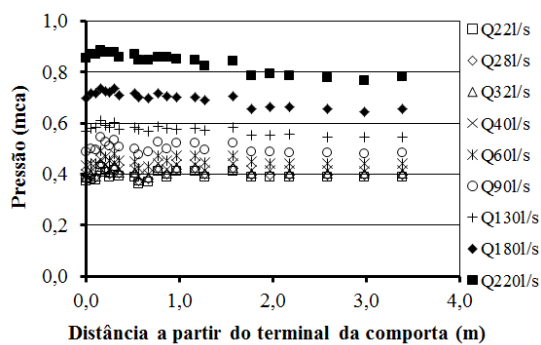


Figura 4.4 - Pressões médias na base do conduto - 100% de abertura da comporta.

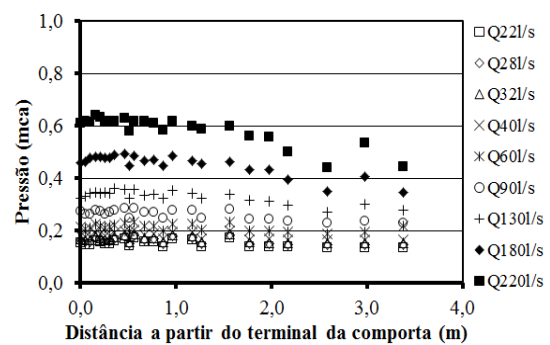


Figura 4.5 - Pressões médias no teto do conduto – 100% de abertura da comporta.

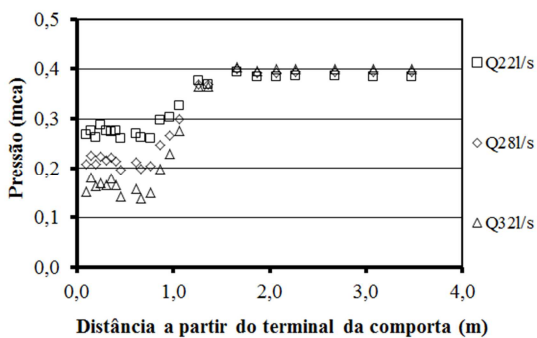


Figura 4.6 - Pressões médias na base do conduto - 10% de abertura da comporta.

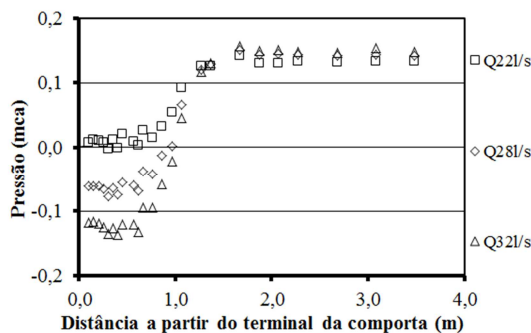


Figura 4.7 - Pressões médias no teto do conduto - 10% de abertura da comporta.

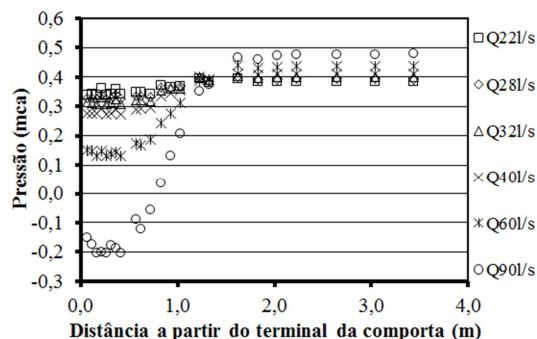


Figura 4.8 - Pressões médias na base do conduto - 30% de abertura da comporta.

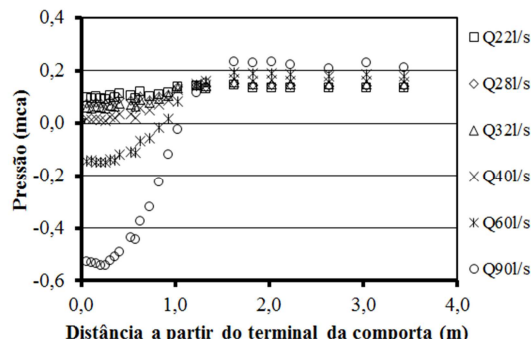


Figura 4.9 - Pressões médias no teto do conduto - 30% de abertura da comporta.

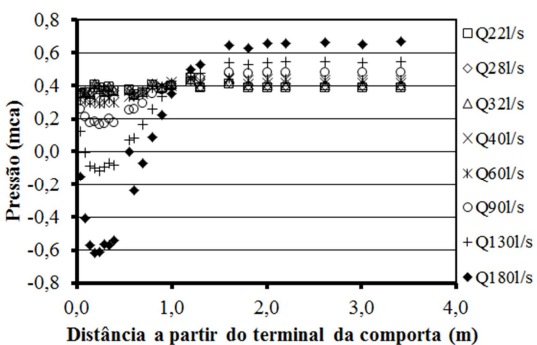


Figura 4.10 - Pressões médias na base do conduto - 50% de abertura da comporta.

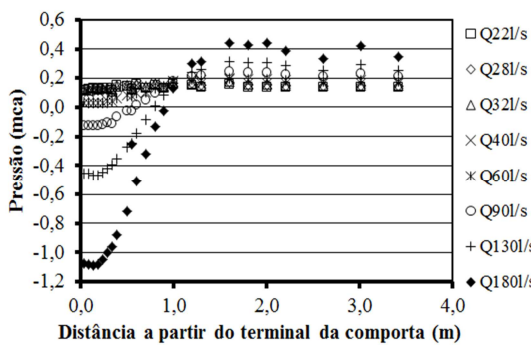


Figura 4.11 - Pressões médias no teto do conduto - 50% de abertura da comporta.

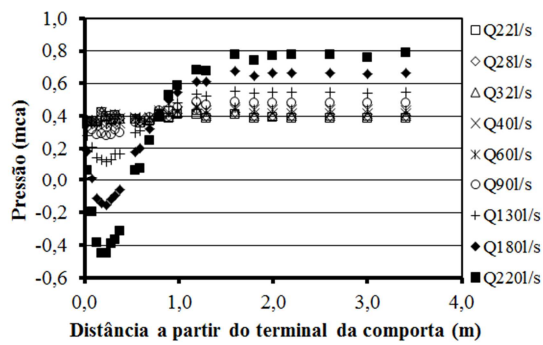


Figura 4.12 - Pressões médias na base do conduto - 60% de abertura da comporta.

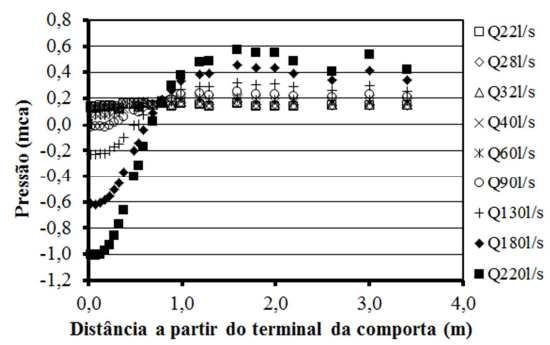


Figura 4.13 - Pressões médias no teto do conduto - 60% de abertura da comporta.

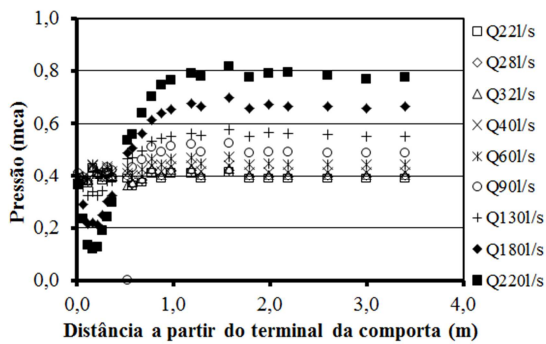


Figura 4.14 - Pressões médias na base do conduto - 70% de abertura da comporta.

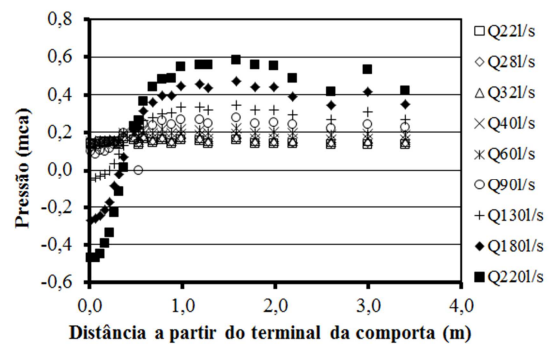


Figura 4.15 - Pressões médias no teto do conduto - 70% de abertura da comporta.

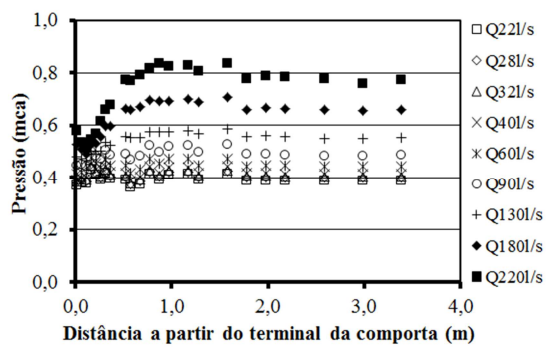


Figura 4.16 - Pressões médias na base do conduto - 80% de abertura da comporta.

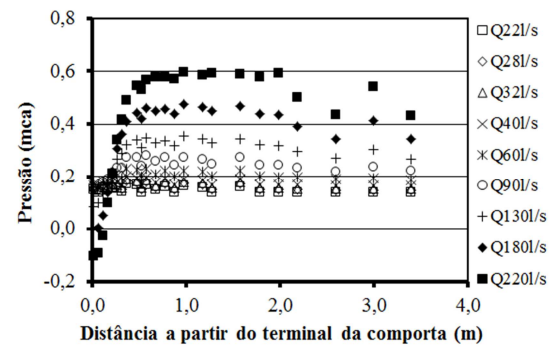


Figura 4.17 - Pressões médias no teto do conduto - 80% de abertura da comporta.

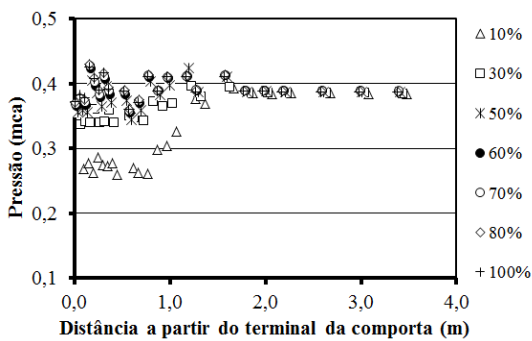


Figura 4.18 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 22 l/s.

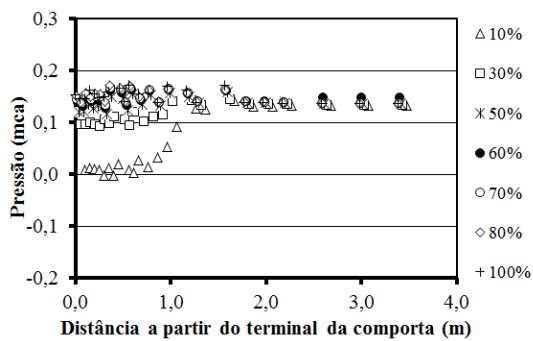


Figura 4.19 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 22 l/s.

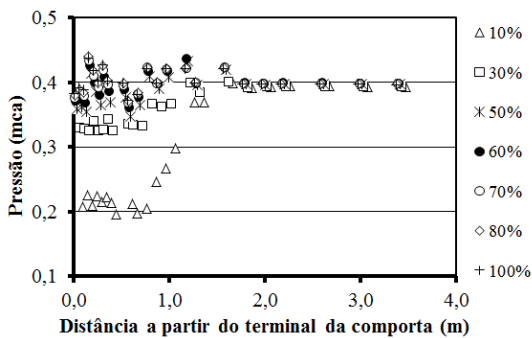


Figura 4.20 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 28 l/s.

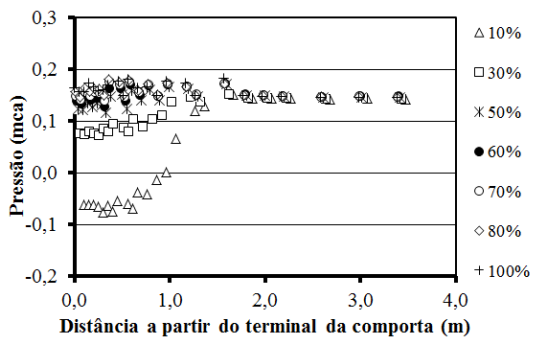


Figura 4.21 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 28 l/s.

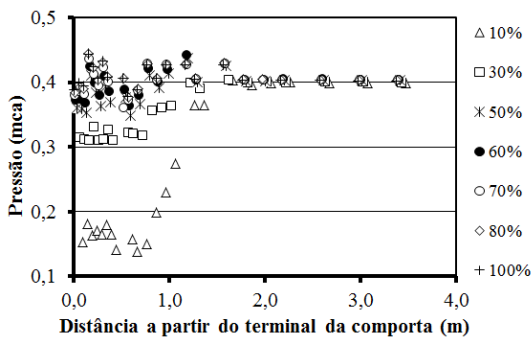


Figura 4.22 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 32 l/s.

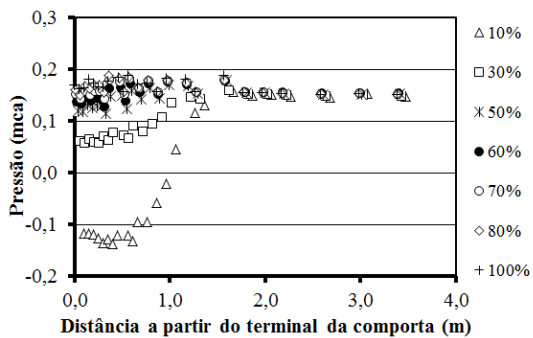


Figura 4.23 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 32 l/s.

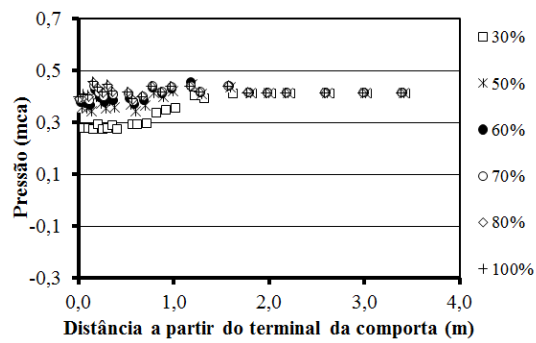


Figura 4.24 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 40 l/s.

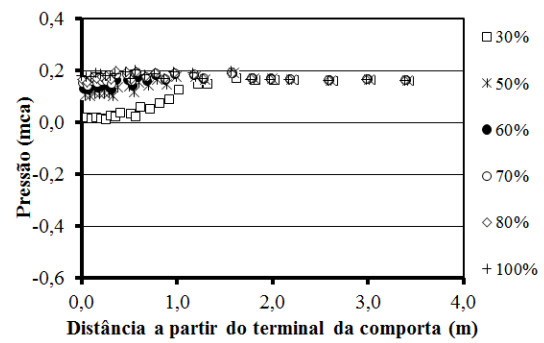


Figura 4.25 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 40 l/s.

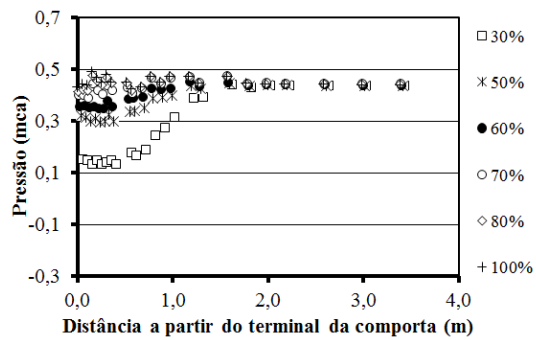


Figura 4.26 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 60 l/s.

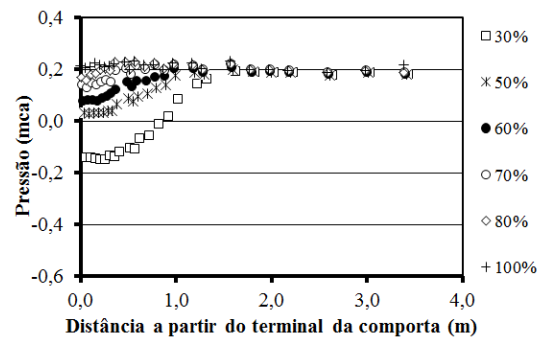


Figura 4.27 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 60 l/s.

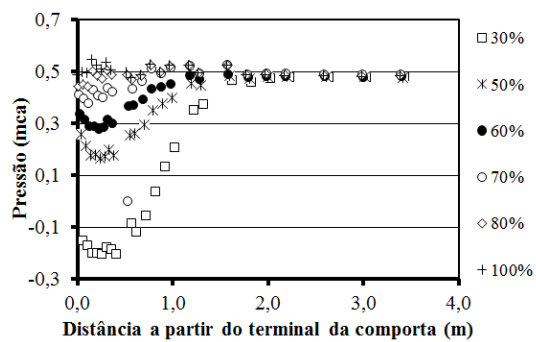


Figura 4.28 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 90 l/s.

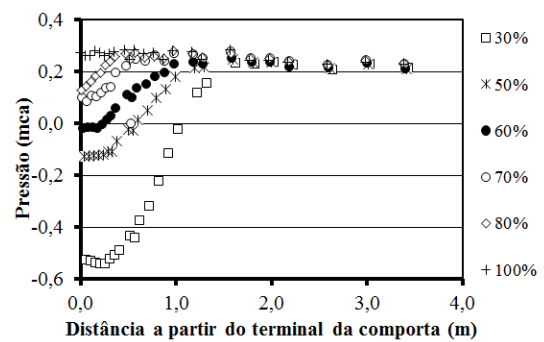


Figura 4.29 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 90 l/s.

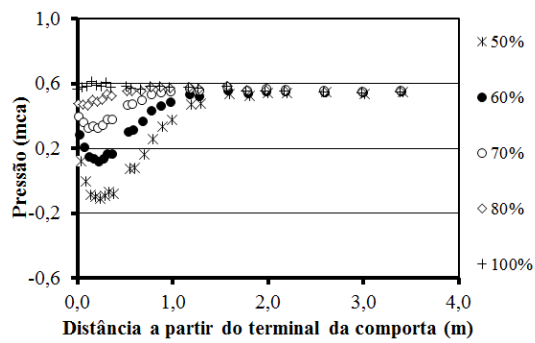


Figura 4.30 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 130 l/s.

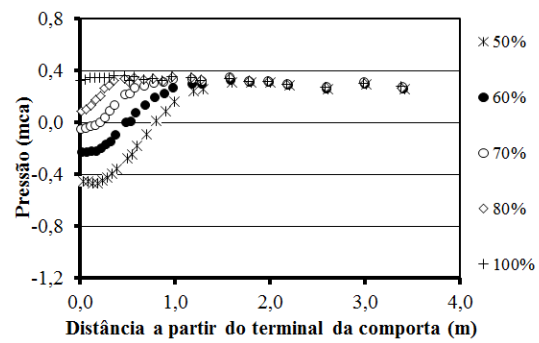


Figura 4.31 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 130 l/s.

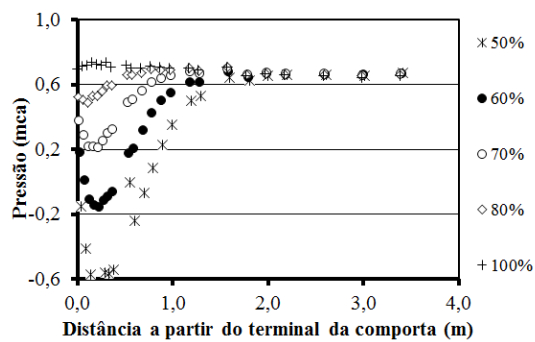


Figura 4.32 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 180 l/s.

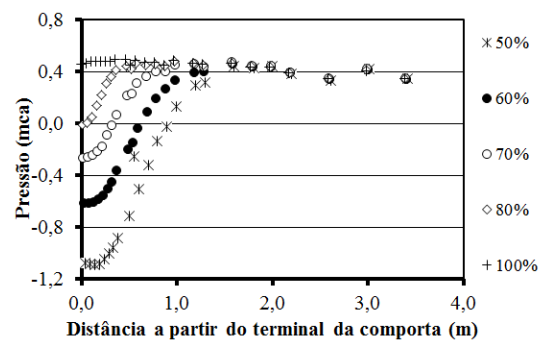


Figura 4.33 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 180 l/s.

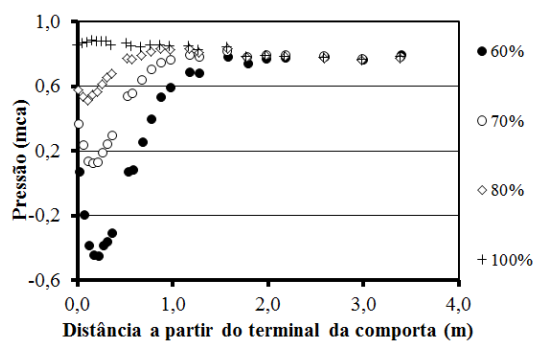


Figura 4.34 - Pressões médias na base do conduto - Vazão 220 l/s.

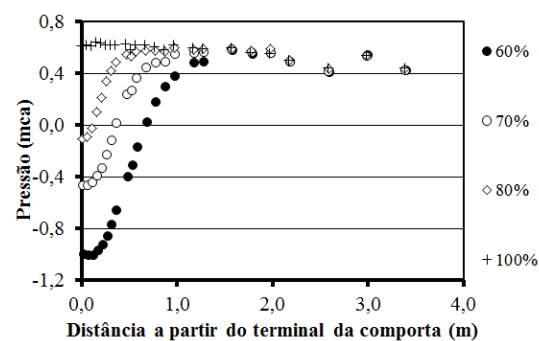


Figura 4.35 - Pressões médias no teto do conduto - Vazão 220 l/s.

Para o caso da comporta completamente aberta, pode-se verificar que houve a tendência de decréscimo dos valores das pressões com o aumento da distância a partir do poço da comporta, devido à perda de carga linear, característica esperada para um

conduto sob pressão. Na região mais próxima ao poço da comporta, para as três maiores vazões, verifica-se que ocorreu uma alteração na linha piezométrica, caracterizada por valores de pressão menores que os subsequentes, o que demonstra a influência dessa singularidade no escoamento.

Para os casos de comporta parcialmente aberta, a pressão na base do conduto a jusante da comporta diminuiu até encontrar a seção da *vena contracta*, trecho onde a energia potencial é convertida em energia cinética. A *vena contracta* representa o ponto de menor pressão e maior velocidade. A partir desse ponto a energia cinética volta a se converter em energia potencial e percebe-se que ocorreu o aumento gradativo das pressões até encontrar o equilíbrio com a energia potencial necessária para vencer as perdas de carga até o reservatório de jusante. Já no teto do conduto, as menores pressões medidas foram as mais próximas à comporta, na região de recirculação do escoamento.

Com o aumento das vazões, o comportamento das pressões junto à base e ao teto do conduto deixou de ter características lineares e passou a obedecer uma curva que lembra o formato do “símbolo de raiz” ($\sqrt{\quad}$).

4.2.1 PRESSÕES MÉDIAS MÍNIMAS

As menores pressões médias registradas nas simulações experimentais foram -0,61 mca na base e -4,35 mca no teto do conduto, ambas para a condição de 180 l/s e 50% de abertura da comporta. A Figura 4.36 e a Figura 4.37 demonstram o comportamento das pressões médias mínimas em função de vazão para a base e para o teto, respectivamente. Observa-se que para uma mesma vazão os menores valores de pressão média na base e no teto foram registrados para os menores graus de abertura da comporta testados.

No entanto, a vazão é função do grau de abertura e da diferença de carga hidráulica (ΔH) entre montante e jusante da comporta e, nas eclusas de navegação, a queda determina as vazões máximas para cada abertura da comporta. A Figura 4.38 e a Figura 4.39 demonstram, respectivamente para a base e para o teto do conduto, o comportamento da pressão média mínima, em mca, em função do diferencial de pressão entre as tomadas 1MB e 37JB, em mca.

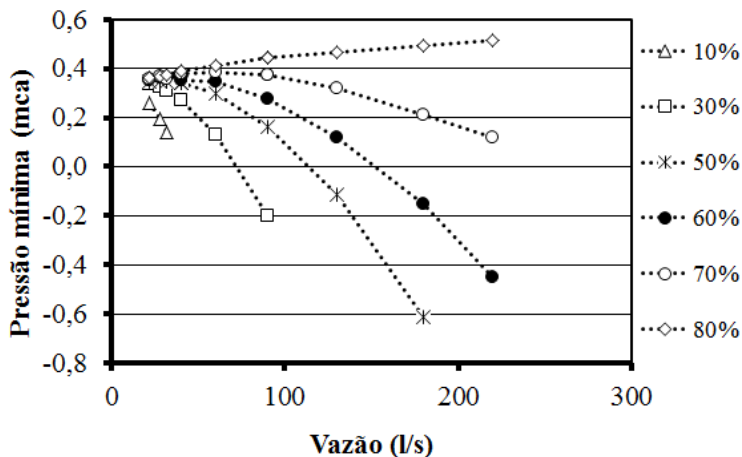


Figura 4.36 - Pressão média mínima registrada experimentalmente na base do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da vazão.

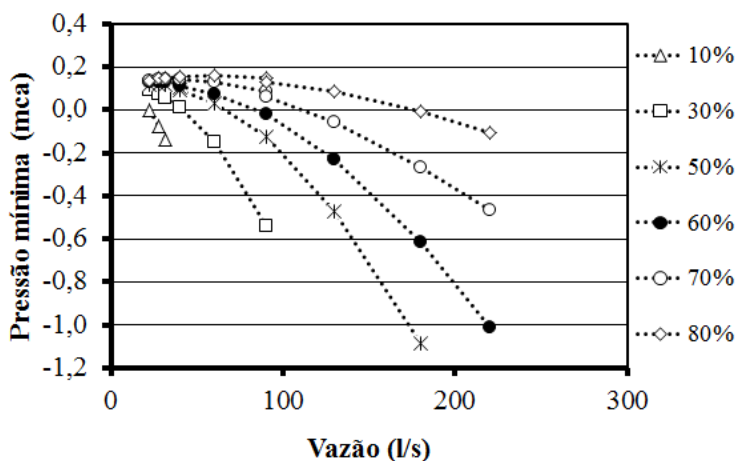


Figura 4.37 - Pressão média mínima registrada experimentalmente no teto do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da vazão.

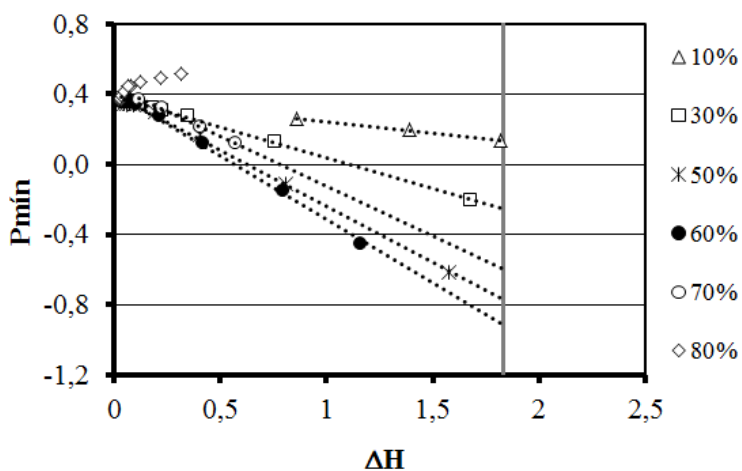


Figura 4.38 - Comportamento da pressão média mínima na base do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta.

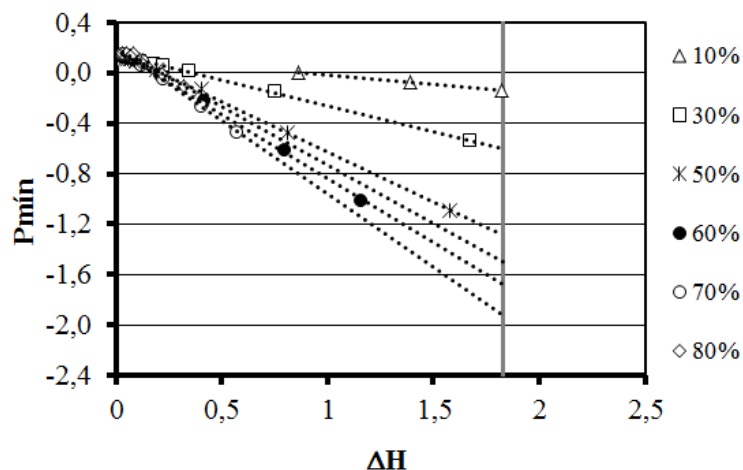


Figura 4.39 - Comportamento da pressão média mínima no teto do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta.

A pressão média mínima na base apresentou a tendência de reduzir linearmente de valor com o aumento do diferencial de pressão entre as faces da comporta para 10%, 30%, 50%, 60% e 70% de abertura da comporta. No teto, essa tendência linear somente não foi verificada para 80% de abertura da comporta.

A Figura 4.40 e a Figura 4.41 demonstram, respectivamente para a base e para o teto do conduto, o comportamento da pressão média mínima, em mca, em função do diferencial de pressão entre as tomadas 1MB e 37JB, em mca, adimensionalizados por uma altura característica da estrutura, que neste caso foi escolhida a altura do conduto (D). As equações ajustadas estão apresentadas na Tabela 4.1 e permitem a estimativa da pressão média mínima para diferenciais de pressão não testados.

A partir da análise da Figura 4.40, caso tivesse sido possível simular experimentalmente o maior ΔH para todos os graus de abertura da comporta, o $\Delta H = 1,82$ mca ($\Delta H/D = 7,28$) utilizado no ensaio de 10% de abertura da comporta que gerou a vazão de 32 l/s, pode-se concluir que para um mesmo $\Delta H/D > 1,5$:

- As tendências demonstraram que as menores pressões médias mínimas na base do conduto seriam atingidas para 60% de abertura da comporta, seguidas pelas aberturas de 50% e 70%; e

- As tendências demonstraram que as menores pressões médias mínimas no teto do conduto seriam atingidas para 70% de abertura da comporta, seguida pelas aberturas de 60% e 80%.

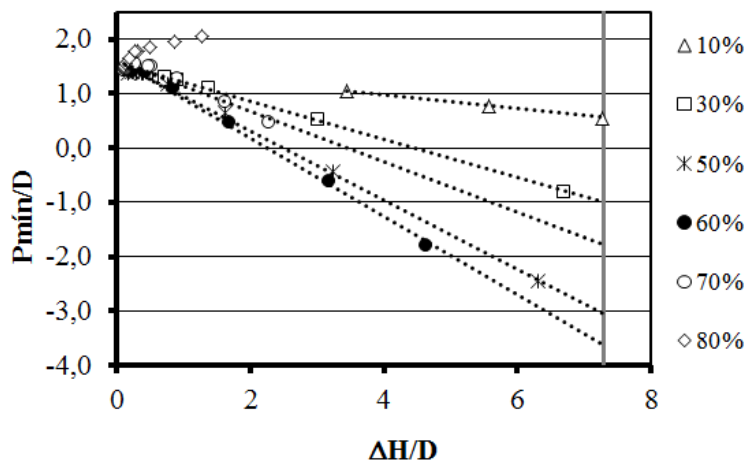


Figura 4.40 - Comportamento da pressão média mínima na base do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta, adimensionalizadas por D

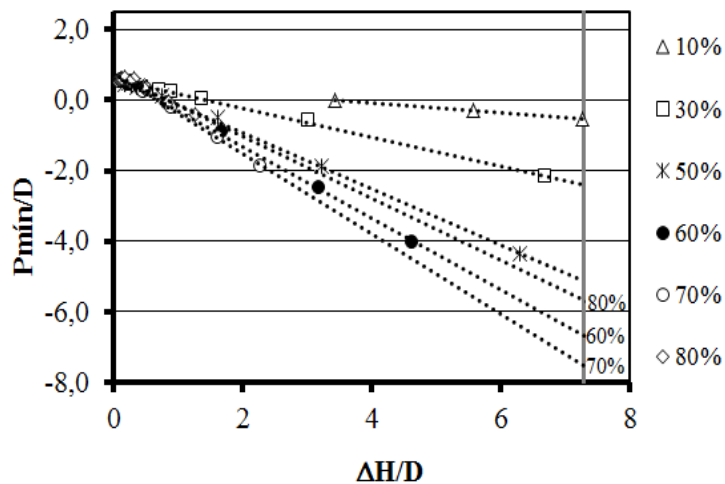


Figura 4.41 - Comportamento da pressão média mínima no teto do conduto, para cada grau de abertura da comporta, em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta, adimensionalizadas por D

Tabela 4.1 - Equações de estimativa da pressão média mínima em função do diferencial de pressão entre as tomadas 1MB e 37JB, adimensionalizados por D .

a/D	Equação para a base	Equação para o teto
10%	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,1263 \frac{\Delta H}{D} + 1,4788$ 4.3 $r^2 = 0,999$	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,1411 \frac{\Delta H}{D} + 0,4794$ 4.4 $r^2 = 1$
30%	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,3503 \frac{\Delta H}{D} + 1,5517$ 4.5 $r^2 = 0,999$	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,4078 \frac{\Delta H}{D} + 0,5915$ 4.6 $r^2 = 0,999$
50%	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,638 \frac{\Delta H}{D} + 1,5979$ 4.7 $r^2 = 0,9977$	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,7953 \frac{\Delta H}{D} + 0,6872$ 4.8 $r^2 = 0,9991$
60%	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,7212 \frac{\Delta H}{D} + 1,6228$ 4.9 $r^2 = 0,9956$	$\frac{P_{mín}}{D} = -1,0141 \frac{\Delta H}{D} + 0,7199$ 4.10 $r^2 = 0,9988$
70%	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,4633 \frac{\Delta H}{D} + 1,6094$ 4.11 $r^2 = 0,9289$	$\frac{P_{mín}}{D} = -1,1346 \frac{\Delta H}{D} + 0,7654$ 4.12 $r^2 = 0,9923$
80%	OBS: Equação não ajustada, pois a pressão média mínima na base não apresentou a tendência de reduzir linearmente de valor com o aumento do diferencial de pressão entre as faces da comporta.	$\frac{P_{mín}}{D} = -0,8794 \frac{\Delta H}{D} + 0,7411$ 4.13 $r^2 = 0,9604$

4.2.2 COEFICIENTES DE PRESSÃO MÉDIA JUNTO À BASE E AO TETO DO CONDUTO

A fim de encontrar uma relação que descreva o comportamento das pressões médias ao longo da base e do teto do conduto e auxilie em sua predição, foi aplicada a técnica de análise dimensional, dando-se preferência à utilização de parâmetros facilmente determináveis.

Da análise dos dados, verificou-se que o comportamento das pressões junto à base e ao teto do conduto depende da combinação entre o grau de abertura e o diferencial de pressão entre as faces da comporta, e, conseqüentemente, da vazão, das velocidades geradas e do número de Reynolds do escoamento.

Sabe-se que quando o movimento do fluido se dá em um conduto fechado, a gravidade não tem influência sobre as características do escoamento, e somente a inércia e a viscosidade devem ser consideradas. O número de Reynolds representa a relação entre as

forças de inércias e as de viscosidade e o escoamento é turbulento para valores de Reynolds a partir de 2.000 ou 3.000.

Todas as simulações foram realizadas com números de Reynolds superiores a 3.000 e o cálculo da perda de carga linear demonstrou que o escoamento na estrutura experimental ocorre no regime turbulento liso.

A partir da análise dos dados de pressão média das simulações experimentais e dos resultados das simulações numéricas, foram percebidos comportamentos diferentes para as pressões médias junto à base e ao teto do conduto e para as linhas isobáricas no interior do conduto em função da vazão e do grau de abertura da comporta.

Para os casos com a comporta parcialmente aberta, foi possível o agrupamento de condições com tendências similares utilizando-se o número de Reynolds calculado a partir da consideração da altura do conduto, como dimensão de referência, e da velocidade média na seção da comporta. As tendências se apresentaram similares para números de Reynolds superiores a 300.000. A Figura 4.42 apresenta as condições de cada ensaio e o número de Reynolds correspondente.

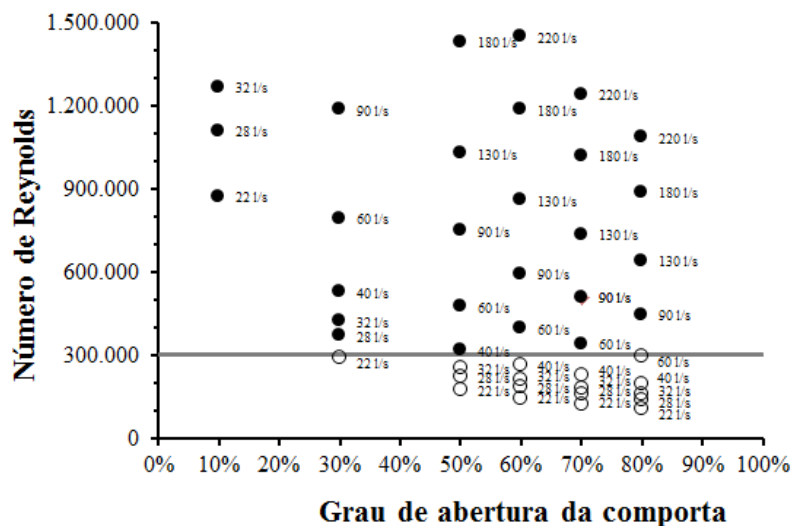


Figura 4.42 - Condições de cada simulação experimental e o número de Reynolds correspondente.

Para os escoamentos com número de Reynolds superior a 300.000, o comportamento das pressões médias ao longo da base e do teto do conduto foi descrito por

um coeficiente adimensional de posição (L_{adm}) e por um coeficiente adimensional de pressão média ($C\bar{P}$).

O coeficiente de posição (L_{adm}) foi obtido pela relação entre a posição (L_i) dos pontos de medição, a partir do terminal da comporta, e a altura resultante do diferencial entre a altura do conduto (D) e a da abertura da comporta (a), conforme a Equação 4.14.

$$L_{adm} = \frac{L_i}{D - a}. \quad 4.14$$

O coeficiente de pressão média ($C\bar{P}$) foi obtido a partir da Equação 4.15.

$$C\bar{P} = \frac{\bar{P} - \bar{P}_{a100\%}}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}}, \quad 4.15$$

na qual:

- \bar{P} = pressão média no ponto de medição para determinado grau de abertura da comporta;
- $\bar{P}_{a100\%}$ = pressão média no ponto de medição para a mesma condição de vazão de \bar{P} e 100% de abertura da comporta;
- V_a = velocidade média na seção da comporta;
- V_D = velocidade média no conduto; e
- g = aceleração devida à gravidade.

A subtração da pressão que ocorreria no ponto de medição para 100% de abertura da comporta eliminou os efeitos da perda de carga distribuída no conduto e amenizou os efeitos da variação do nível no reservatório de jusante para diferentes vazões, permitindo o tratamento isolado da influência do grau de abertura da comporta no comportamento das pressões médias.

No denominador da Equação 4.15 foi aplicado o diferencial entre a energia cinética média na seção sob a comporta e a energia cinética média do escoamento a jusante da comporta.

Poderia ser interessante a utilização da energia cinética média na seção da *vena contracta*. Contudo, isso dificultaria a utilização da relação proposta, pois a contração do escoamento a jusante da comporta seria uma estimativa. As velocidades médias na seção

da comporta e do conduto são de cálculo fácil para cada vazão e abertura da comporta e, por isso, foram adotadas.

4.2.2.1 COEFICIENTE DE PRESSÃO MÉDIA JUNTO À BASE DO CONDUTO

Para a base do conduto, a relação entre o coeficiente de pressão média ($C\bar{P}$) e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foi mais bem representada, para cada grau de abertura da comporta, pela função racional apresentada na Equação 4.16. Os coeficientes b_i estão apresentados na Tabela 4.2, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$C\bar{P} = \frac{b_1 + b_2 L_{adm}}{1 + b_3 L_{adm} + b_4 L_{adm}^2} \quad 4.16$$

Tabela 4.2 - Coeficientes para a Equação 4.16 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto.

Coeficiente	<i>a/D</i> 10%	<i>a/D</i> 30%	<i>a/D</i> 50%	<i>a/D</i> 60%	<i>a/D</i> 70%	<i>a/D</i> 80%
<i>b</i>₁	-0,15370	-0,55759	-0,75340	-0,75448	-0,75199	-0,71419
<i>b</i>₂	0,01558	-0,00265	-0,01095	-0,07542	0,00007	0,01765
<i>b</i>₃	-0,30966	-0,27050	-0,26870	-0,29686	-0,26400	-0,18260
<i>b</i>₄	0,05477	0,07424	0,06189	0,07663	0,04931	0,03169
Desvio Padrão	0,014	0,091	0,100	0,157	0,066	0,100
Coeficiente de correlação (R²)	0,98	0,95	0,97	0,95	0,99	0,96

As equações ajustadas para representar o comportamento das pressões médias ao longo da base do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,95. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 60% de abertura da comporta. No entanto, pela análise dos gráficos apresentados da Figura 4.43 até a Figura 4.48, com destaque para a condição com 30% de abertura da comporta, observa-se que os valores que mais se afastaram das curvas ajustadas foram os referentes às menores vazões, condições de menor solicitação da estrutura.

Da Figura 4.43 até a Figura 4.48 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão para a base do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.49 mostra em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas.

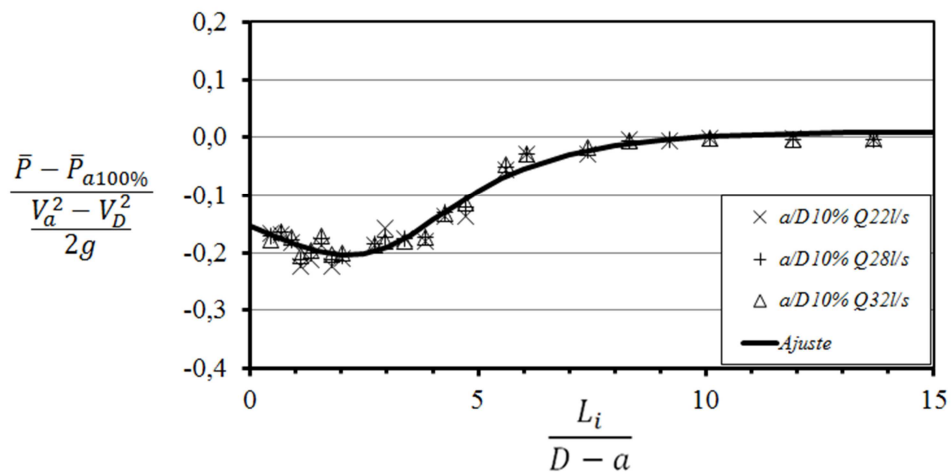


Figura 4.43 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.

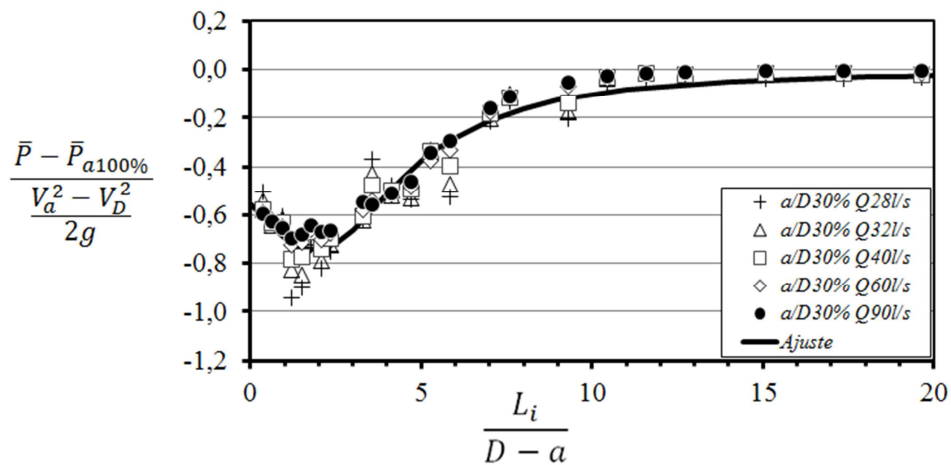


Figura 4.44 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.

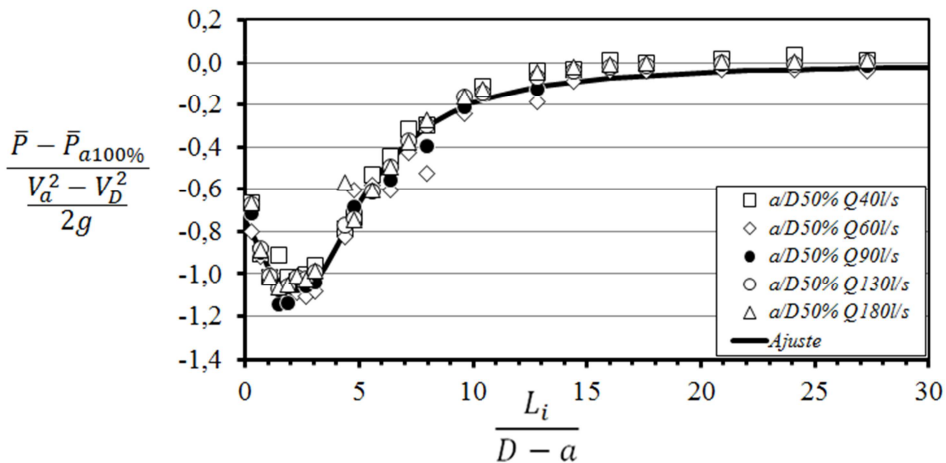


Figura 4.45 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.

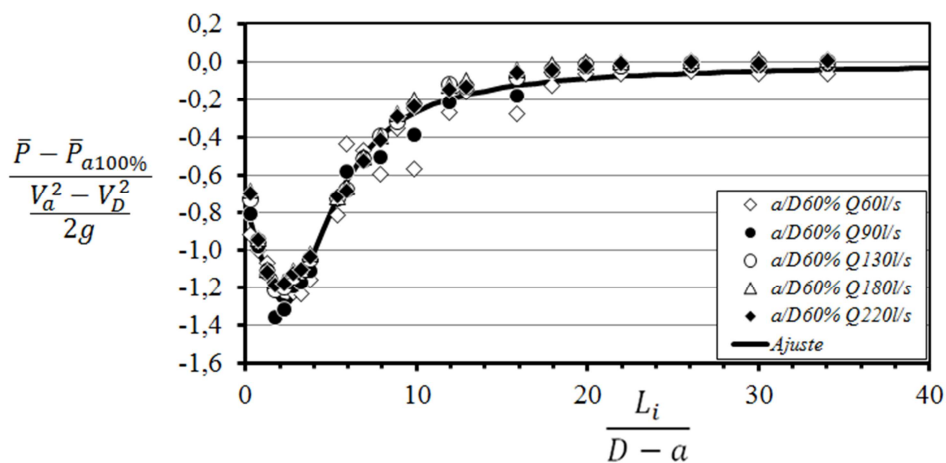


Figura 4.46 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.

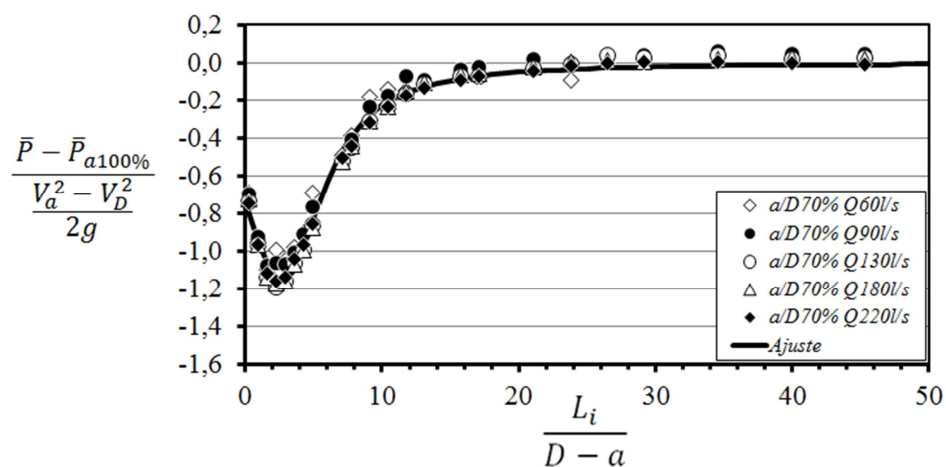


Figura 4.47 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.

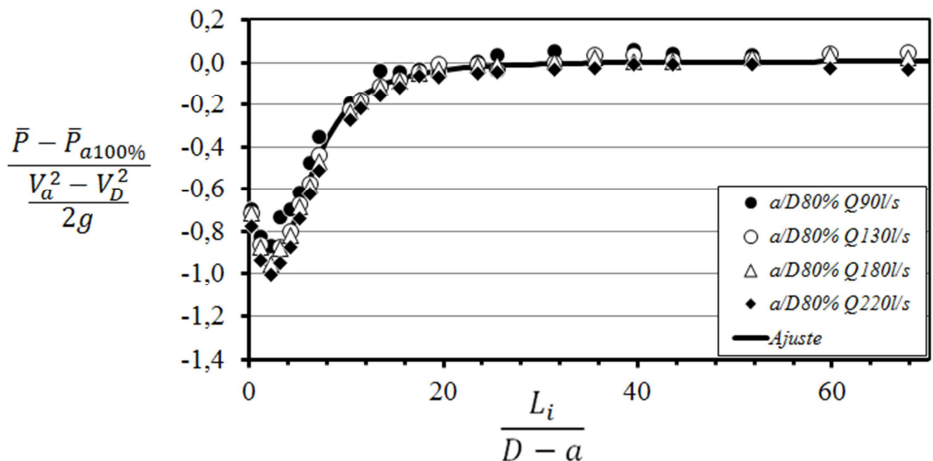


Figura 4.48 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.

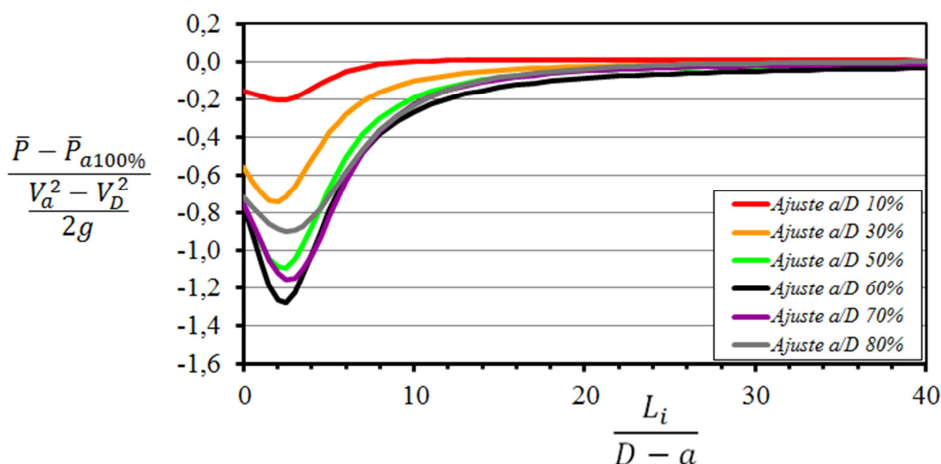


Figura 4.49 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto.

Os valores dos coeficientes de pressão média na base do conduto tenderam a diminuir com o incremento da distância da comporta até determinado ponto a partir do qual os valores dos coeficientes passam a aumentar. A curva formada por essa variação na região próxima à comporta teve o formato mais suave para 10% de abertura da comporta. Com o aumento do grau de abertura da comporta, até 60%, as curvas ficaram mais agudas e o menor valor do coeficiente de pressão média para a base do conduto foi atingido para o grau de abertura da comporta igual a 60%.

Os valores dos coeficientes b_i da Equação 4.16, apresentados na Tabela 4.2, variaram conforme o grau de abertura da comporta, na forma apresentada na Figura 4.50.

Exceto para b_1 , os ajustes de curvas para representar a relação entre os coeficientes b_i da Equação 4.16 e o grau de abertura da comporta não são considerados satisfatórios. Dessa forma, não se recomenda a estimativa de valores de coeficientes b_i para a aplicação da Equação 4.16 a graus de abertura da comporta não testados nesta pesquisa.

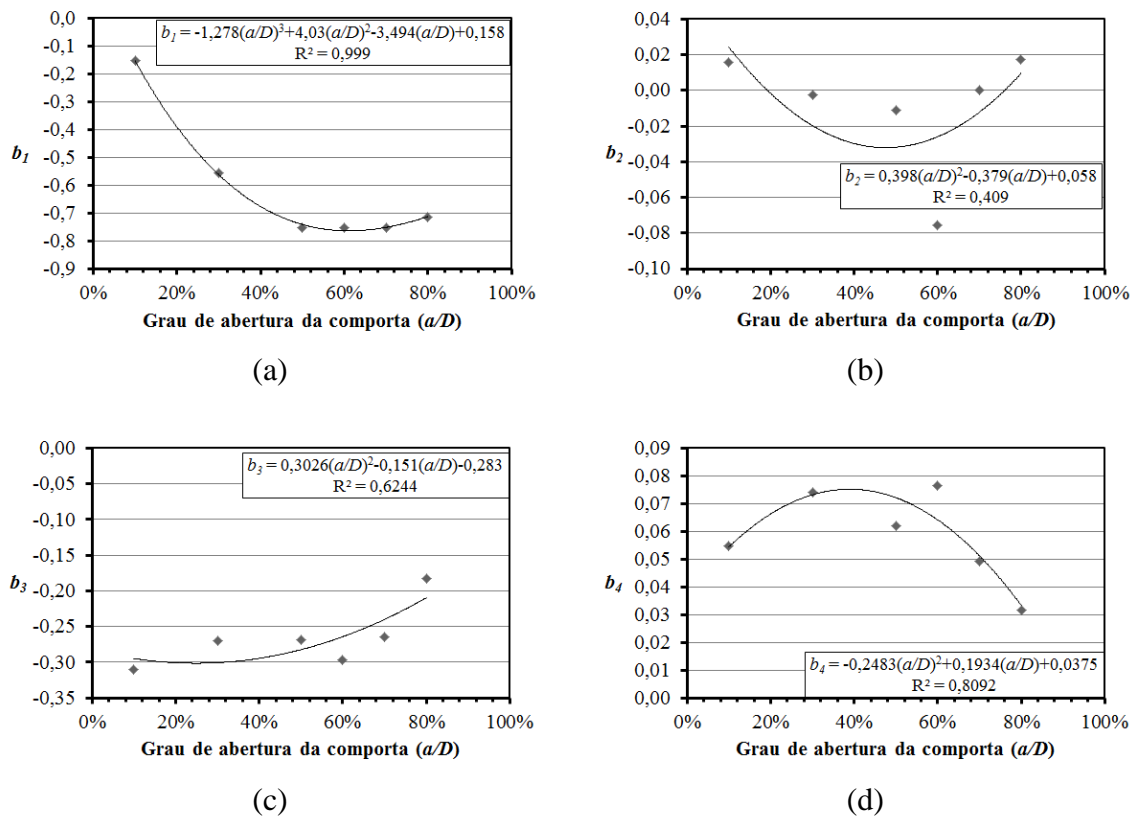


Figura 4.50 - Relação entre os coeficientes b_i da Equação 4.16 e o grau de abertura da comporta.

4.2.2.2 COEFICIENTE DE PRESSÃO MÉDIA JUNTO AO TETO DO CONDUTO

Para o teto do conduto, a relação entre o coeficiente de pressão média ($C\bar{P}$) e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foi mais bem representada, para cada grau de abertura da comporta, pela função racional apresentada na Equação 4.17. Os coeficientes t_i são apresentados na Tabela 4.3, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$C\bar{P} = \frac{1}{t_1 + t_2 L_{adm}^{t_3}} \quad 4.17$$

Tabela 4.3 - Coeficientes para a Equação 4.17 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
t_1	-4,39197	-1,26092	-0,81084	-0,65331	-0,60448	-0,52380
t_2	-0,00014	-0,00080	-0,00231	-0,00482	-0,00337	-0,00422
t_3	6,73315	4,28624	3,32734	2,78370	3,03151	3,26083
Desvio Padrão	0,011	0,078	0,111	0,144	0,176	0,175
Coeficiente de correlação (R ²)	0,99	0,97	0,98	0,97	0,96	0,97

As equações ajustadas para representar o comportamento das pressões médias ao longo do teto do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,96. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 70% de abertura da comporta. Assim como para a base, observa-se que os dados que mais se afastaram das curvas ajustadas foram os referentes às menores vazões, condições de menor solicitação da estrutura.

Da Figura 4.51 até a Figura 4.56 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão para o teto do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.57 mostra em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas.

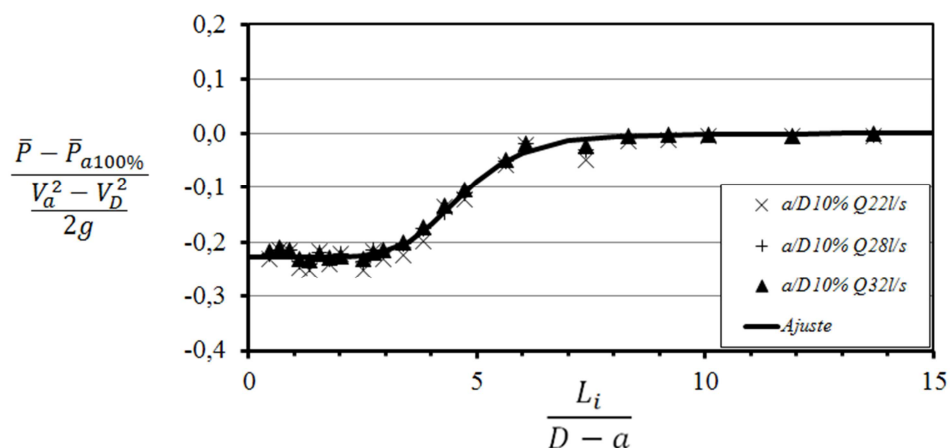


Figura 4.51 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.

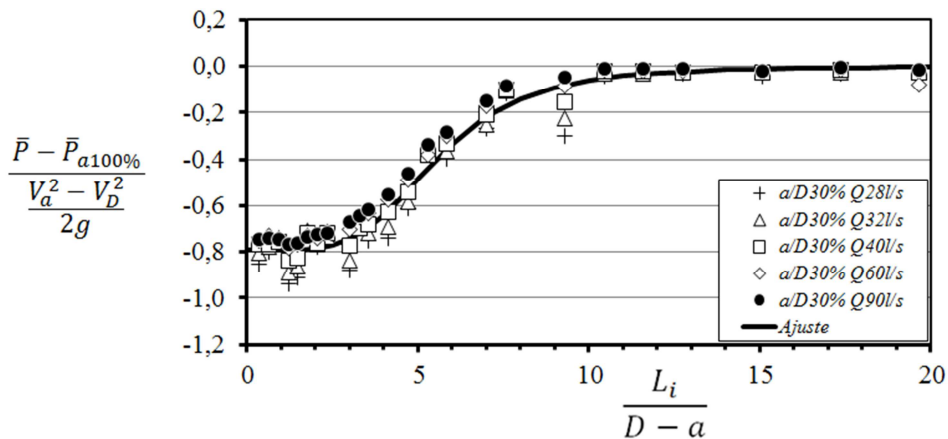


Figura 4.52 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.

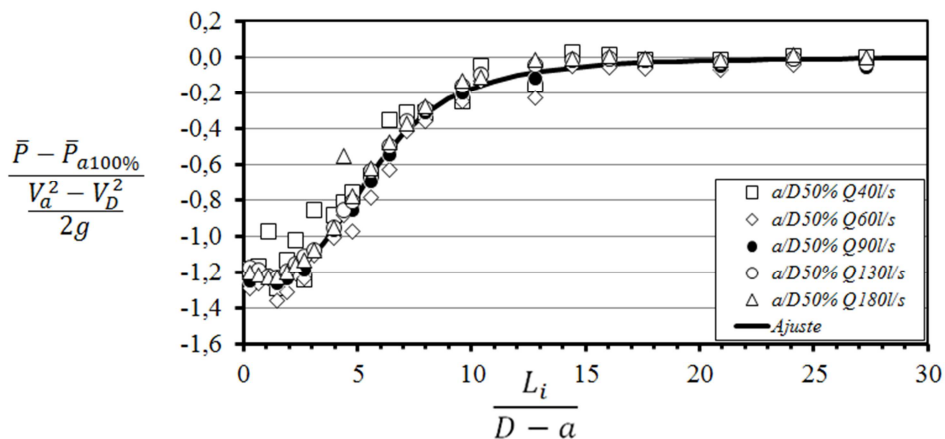


Figura 4.53 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.

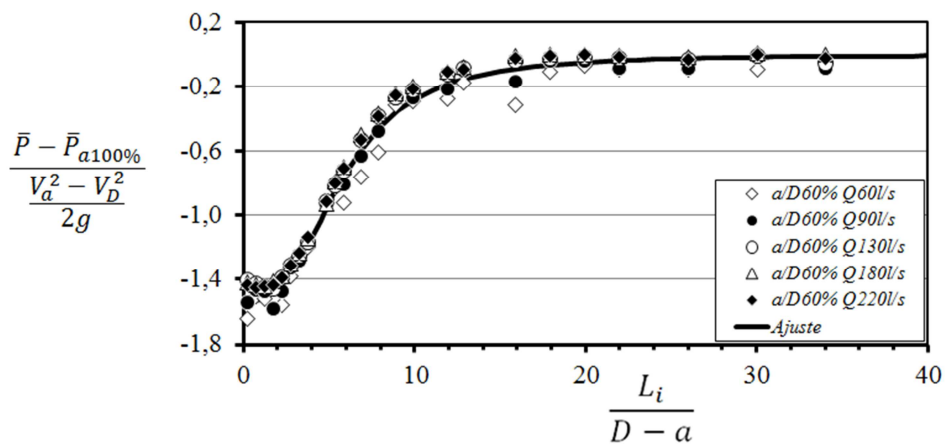


Figura 4.54 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.

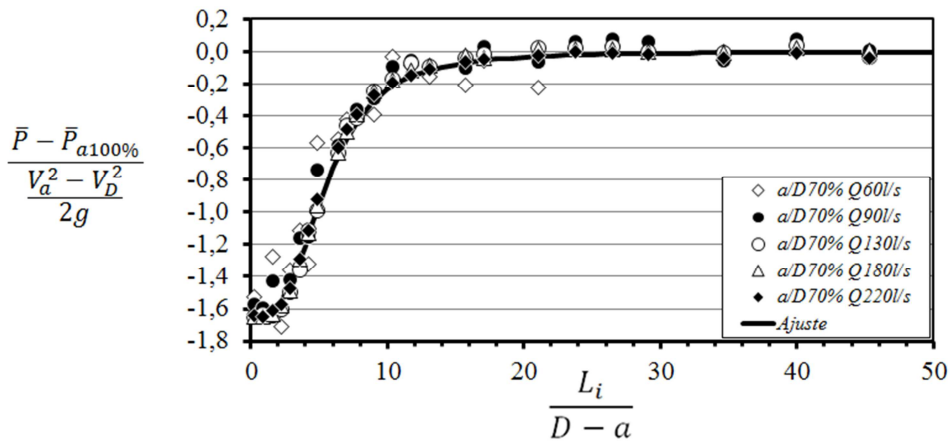


Figura 4.55 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.

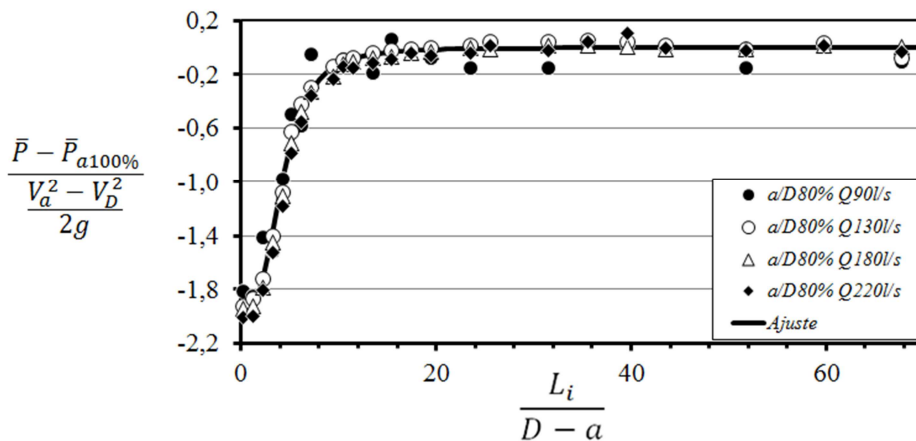


Figura 4.56 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.

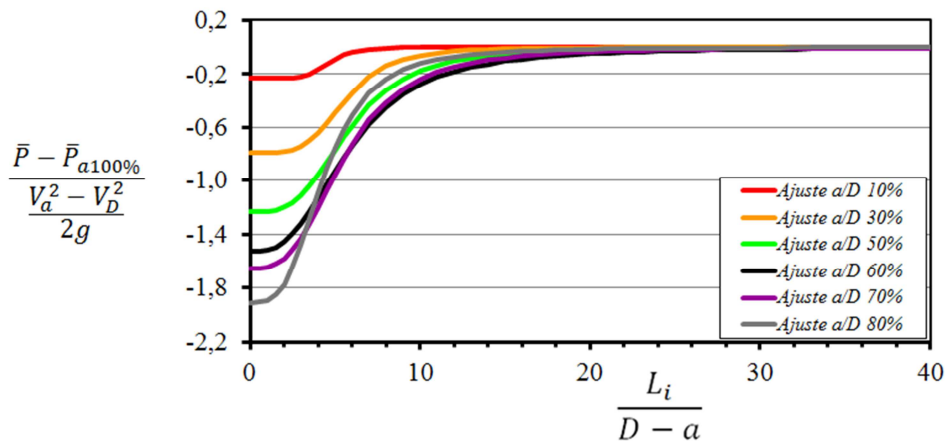


Figura 4.57 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para o teto do conduto.

Os valores dos coeficientes de pressão média no teto do conduto tenderam a aumentar com o incremento da distância da comporta e os valores mínimos do coeficiente diminuiram conforme aumentou o grau de abertura da comporta.

Os coeficientes t_i da Equação 4.17, apresentados na Tabela 4.3, variaram conforme o grau de abertura da comporta, na forma apresentada na Figura 4.58.

As curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes t_i da Equação 4.17 e o grau de abertura da comporta apresentaram coeficiente de correlação superior a 0,82. No entanto, percebe-se que para um grau de abertura de relevância quanto à solicitação da estrutura para grandes vazões (60% de abertura da comporta), o valor de t_2 obtido da equação ajustada foi 30% menor que o valor esperado.

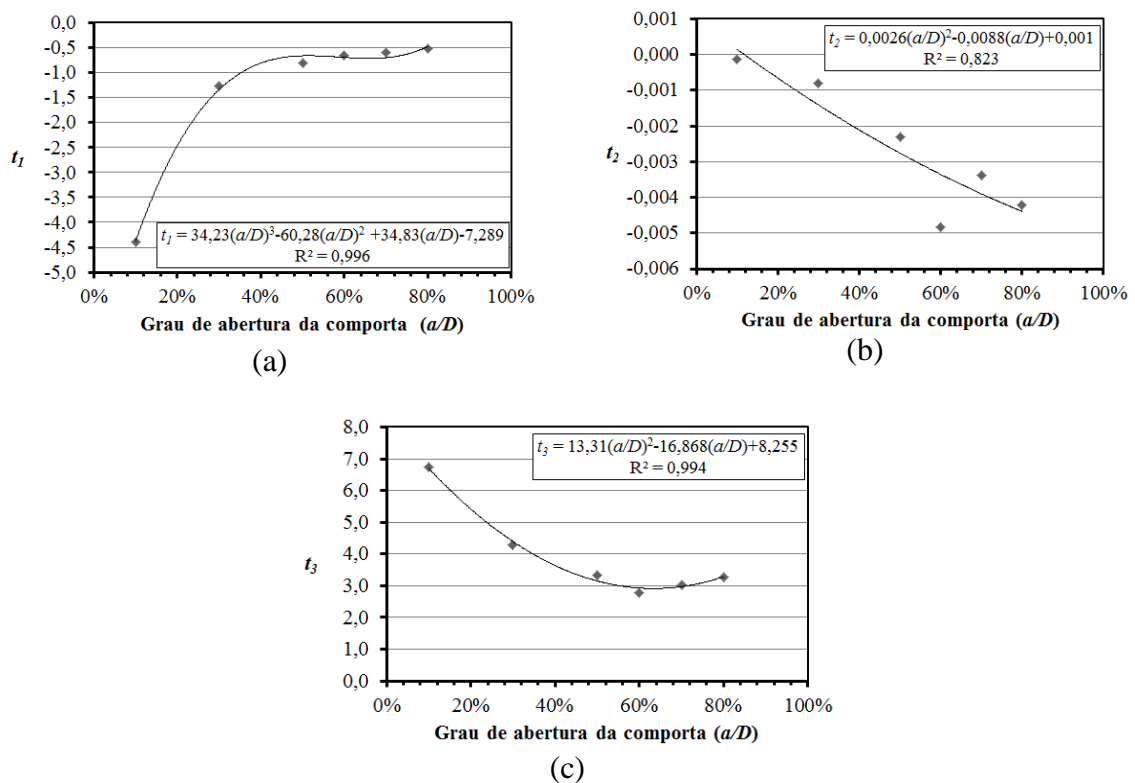


Figura 4.58 - Relação entre os coeficientes t_i da Equação 4.17 e o grau de abertura da comporta.

Para a mesma posição adimensional e o mesmo grau de abertura da comporta, foi ajustado um valor de coeficiente de pressão média ($C\bar{P}$). O valor mínimo de $C\bar{P}$ variou em função do grau de abertura da comporta conforme apresenta a Figura 4.59.

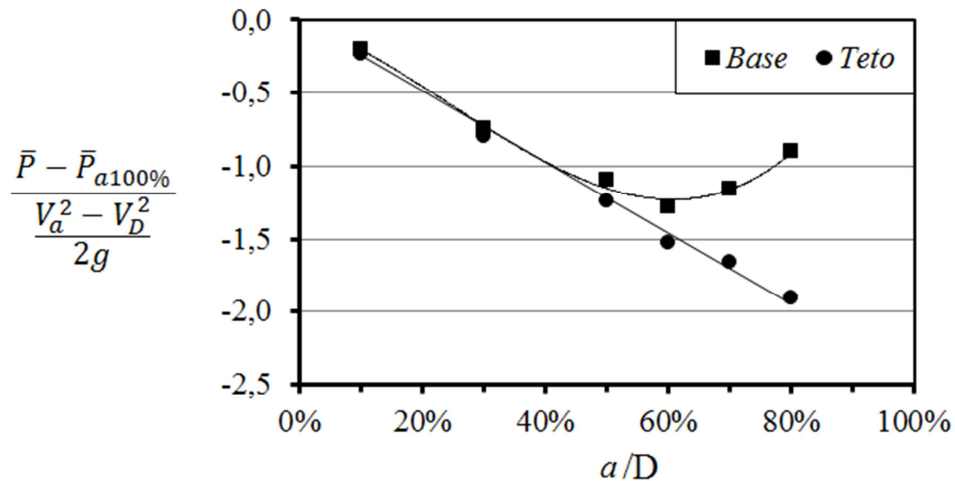


Figura 4.59 - Relação entre o valor mínimo do coeficiente de pressão média para a base e para o teto do conduto e o grau de abertura da comporta.

Para o teto do conduto, o valor mínimo de $C\bar{P}$ decresceu linearmente com o aumento do grau de abertura da comporta. Até 50% de abertura da comporta os valores mínimos de $C\bar{P}$ foram próximos para a base e para o teto do conduto. Mas, para a base do conduto, o valor mínimo de $C\bar{P}$ cresceu a partir de 60% de abertura da comporta.

A Equação 4.18 representa a relação obtida entre o valor mínimo de $C\bar{P}$ e o grau de abertura da comporta para o teto do conduto, enquanto a Equação 4.19 representa essa mesma relação para a base do conduto.

$$\text{Mínimo } C\bar{P} = -2,4353 a. \quad 4.18$$

$$\text{Mínimo } C\bar{P} = 6,5723a^3 - 4,6613a^2 - 1,6161a. \quad 4.19$$

4.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM COMPARAÇÃO COM OS DADOS DAS SIMULAÇÕES EXPERIMENTAIS

4.3.1 PRESSÃO MÉDIA

As pressões médias registradas experimentalmente ao longo do teto e da base do conduto foram utilizadas para verificar o ajuste dos resultados numéricos das simulações feitas no *Flow-3D*®, conforme pode ser visualizado da Figura 4.60 até a Figura 4.83. Para a comparação foram utilizados dados de pressão das simulações numéricas nas posições $z = 0,00125$ m e $z = 0,24875$ m, correspondentes aos nós de cálculo mais próximos à base e ao teto do conduto, respectivamente.

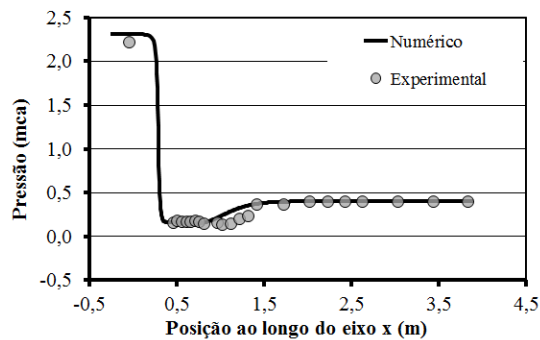


Figura 4.60 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.

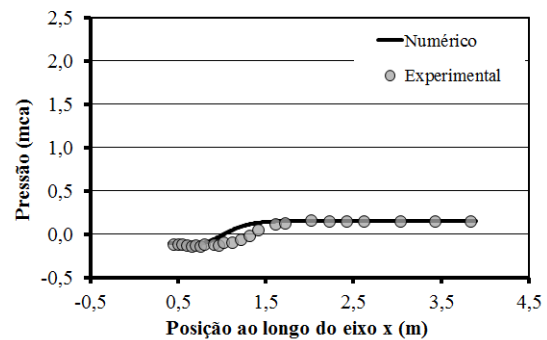


Figura 4.61 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.

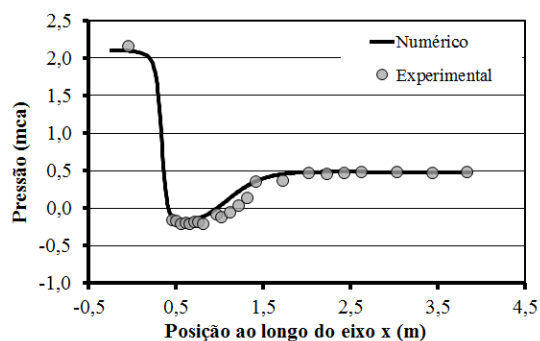


Figura 4.62 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.

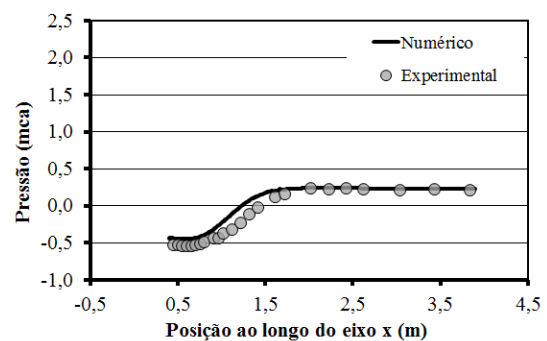


Figura 4.63 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.

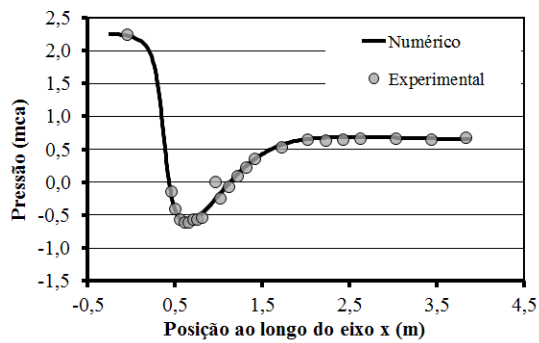


Figura 4.64 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.

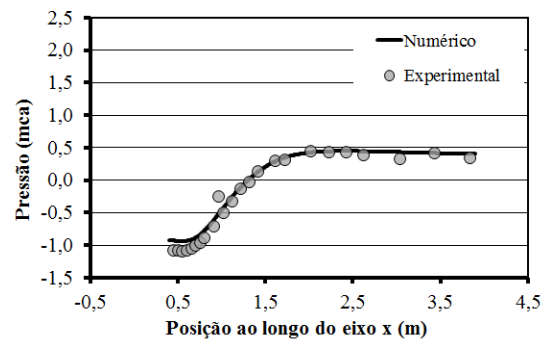


Figura 4.65 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.

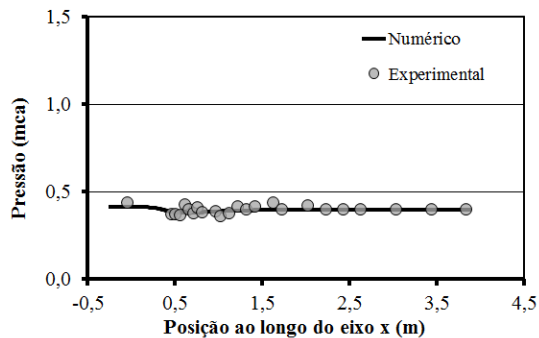


Figura 4.66 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 28 l/s de vazão.

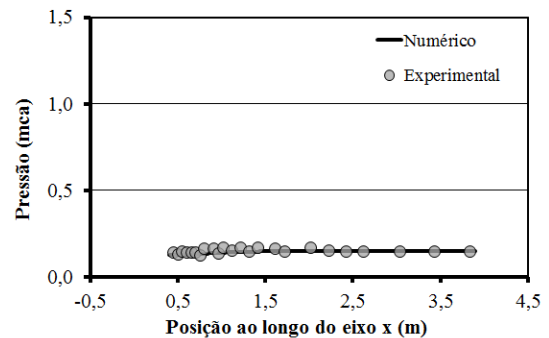


Figura 4.67 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 28 l/s de vazão.

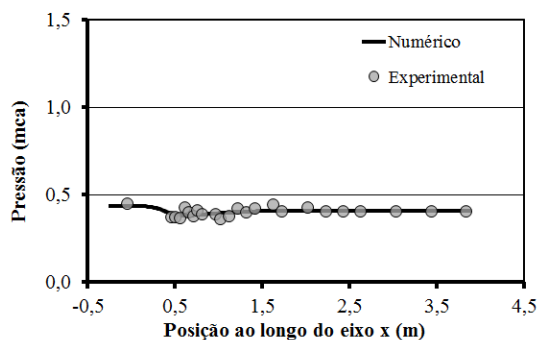


Figura 4.68 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.

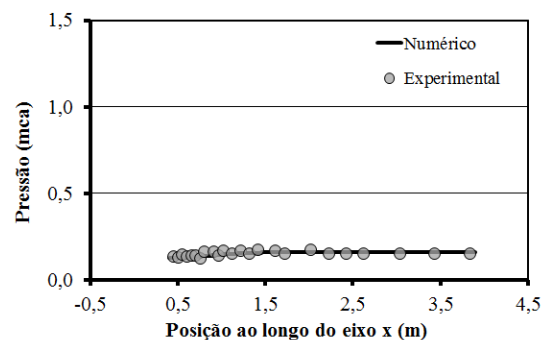


Figura 4.69 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão.

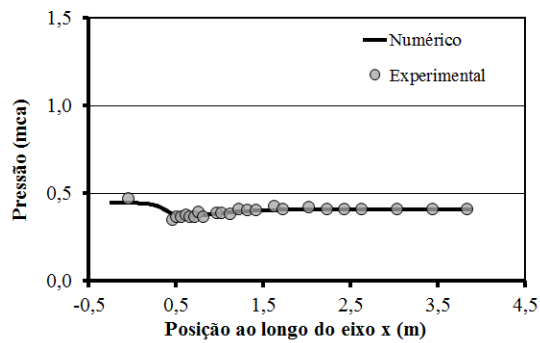


Figura 4.70 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 40 l/s de vazão.

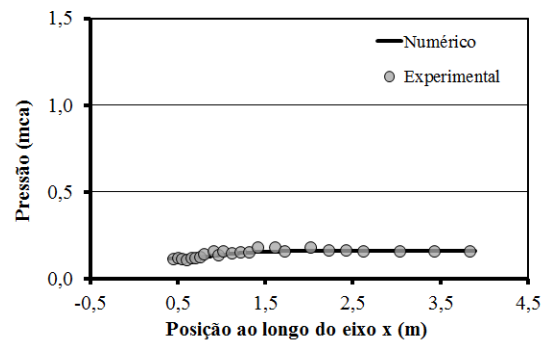


Figura 4.71 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 40 l/s de vazão.

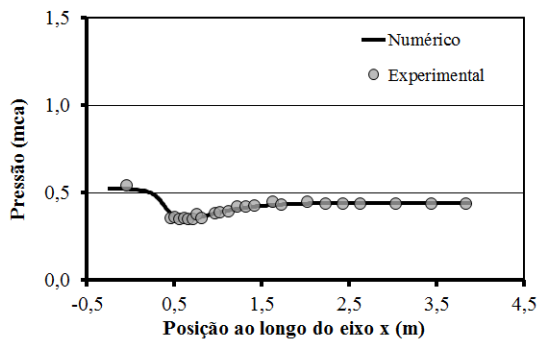


Figura 4.72 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 60 l/s de vazão.

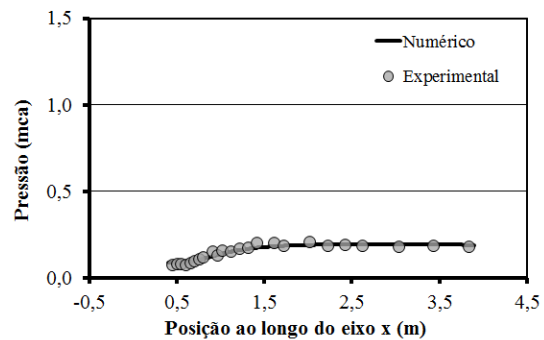


Figura 4.73 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 60 l/s de vazão.

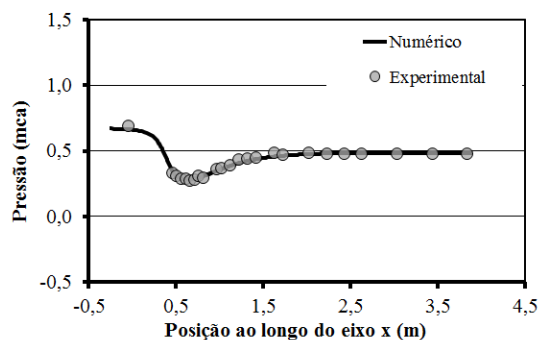


Figura 4.74 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.

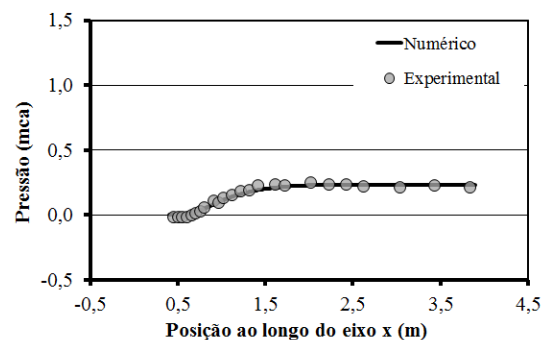


Figura 4.75 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão.

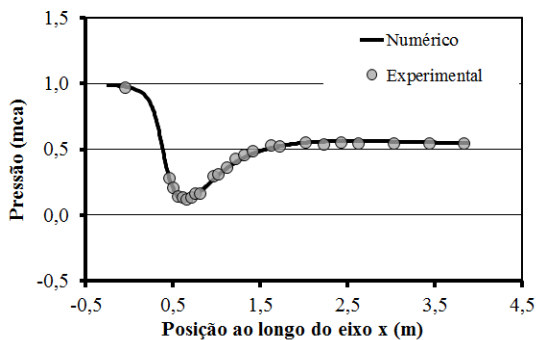


Figura 4.76 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 130 l/s de vazão.

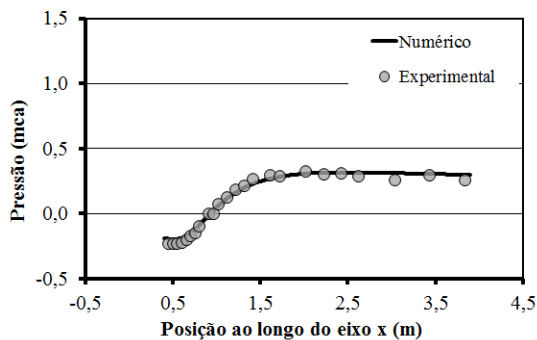


Figura 4.77 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 130 l/s de vazão.

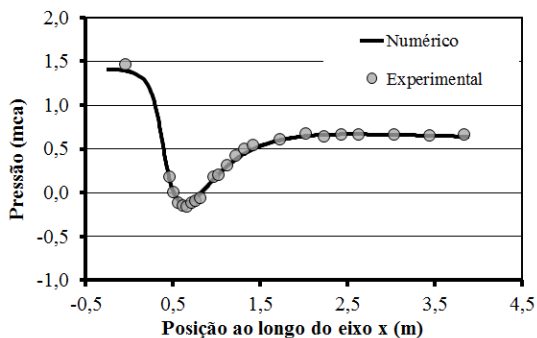


Figura 4.78 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.

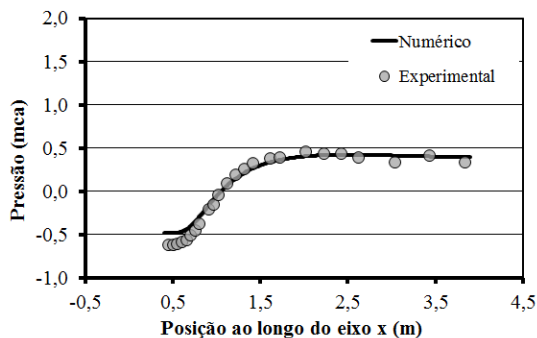


Figura 4.79 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão.

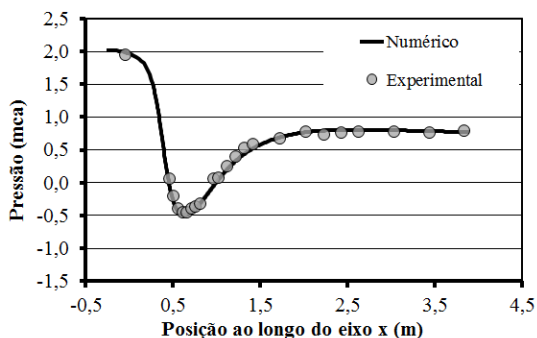


Figura 4.80 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.

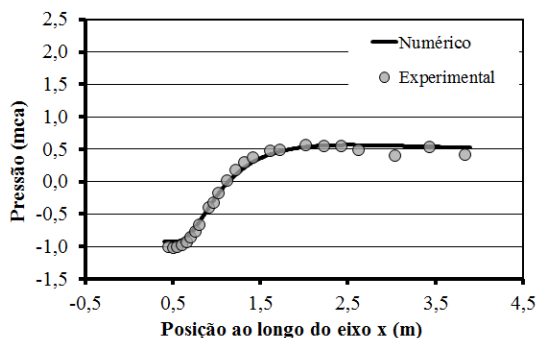


Figura 4.81 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.

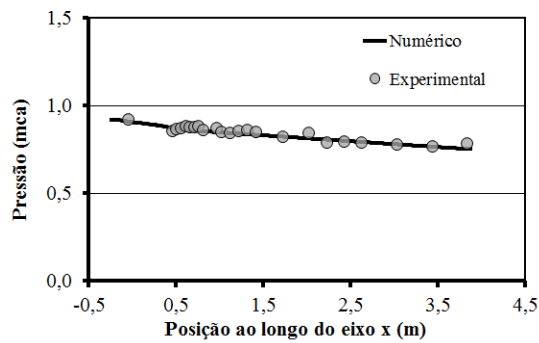


Figura 4.82 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo da base do conduto para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.

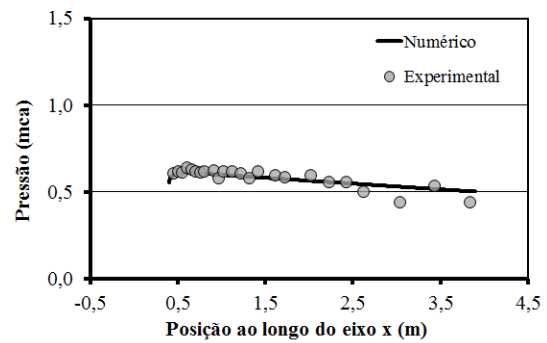


Figura 4.83 - Resultados numéricos e dados experimentais de pressão média ao longo do teto do conduto para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão.

A análise dos resultados apresentados da Figura 4.60 até a Figura 4.83 permite observar que houve concordância entre os dados numéricos e experimentais para todas as condições simuladas.

O modelo numérico representou a pressão a montante da comporta e os formatos das curvas de pressão ao longo da base e do teto do conduto a jusante da comporta, apresentando resultados mais aderentes para a base.

Da Tabela 4.4 à Tabela 4.6 são apresentadas as diferenças absolutas e relativas entre as simulações experimentais e numéricas para a pressão média na base a montante da comporta, para a pressão mínima na base e no teto do conduto a jusante da comporta.

Tabela 4.4 - Diferenças entre as simulações experimental (*Exp*) e numérica (*Num*) para a pressão média na base a montante da comporta ($P_{montante}$).

<i>a</i> (%)	<i>Q</i> (l/s)	<i>Exp</i> (mca)	<i>Num</i> (mca)	(<i>Num</i> – <i>Exp</i>) (mca)	$\left(\frac{Num - Exp}{Exp}\right) * 100\%$ (mca)
10	32	2,219	2,316	0,097	4,4%
30	90	2,157	2,105	-0,051	-2,4%
50	180	2,247	2,254	0,008	0,3%
60	28	0,439	0,415	-0,025	-5,6%
60	32	0,450	0,437	-0,013	-2,8%
60	40	0,478	0,446	-0,031	-6,6%
60	60	0,543	0,523	-0,020	-3,6%
60	90	0,692	0,669	-0,023	-3,3%
60	130	0,968	0,987	0,018	1,9%
60	180	1,462	1,411	-0,051	-3,5%
60	220	1,947	2,017	0,070	3,6%
100	220	0,922	0,920	-0,002	-0,2%

Tabela 4.5 - Diferenças entre as simulações experimental (*Exp*) e numérica (*Num*) para a pressão média mínima na base a jusante da comporta.

<i>a</i> (%)	<i>Q</i> (l/s)	<i>Exp</i> (mca)	<i>Num</i> (mca)	(<i>Num</i> – <i>Exp</i>) (mca)	$\left(\frac{Num - Exp}{Exp}\right) * 100\%$ (mca)	$\left(\frac{Num - Exp}{P_{montante} Exp}\right) * 100\%$ (mca)
10	32	0,139	0,144	0,005	3,6%	0,2%
30	90	-0,204	-0,170	0,034	-16,6%	1,6%
50	180	-0,615	-0,598	0,018	-2,9%	0,8%
60	28	0,361	0,379	0,018	5,0%	4,1%
60	32	0,363	0,382	0,019	5,2%	4,2%
60	40	0,367	0,370	0,003	0,8%	0,6%
60	60	0,347	0,352	0,004	1,2%	0,8%
60	90	0,278	0,282	0,004	1,5%	0,6%
60	130	0,118	0,116	-0,002	-1,4%	-0,2%
60	180	-0,154	-0,118	0,036	-23,6%	2,5%
60	220	-0,451	-0,493	-0,042	9,4%	-2,2%

Tabela 4.6 - Diferenças entre as simulações experimental (*Exp*) e numérica (*Num*) para a pressão média mínima no teto a jusante da comporta.

<i>a</i> (%)	<i>Q</i> (l/s)	<i>Exp</i> (mca)	<i>Num</i> (mca)	(<i>Num</i> – <i>Exp</i>) (mca)	$\left(\frac{Num - Exp}{Exp}\right) * 100\%$ (mca)	$\left(\frac{Num - Exp}{P_{montante\ Exp}}\right) * 100\%$ (mca)
10	32	-0,137	-0,115	0,022	-16,2%	1,0%
30	90	-0,541	-0,444	0,097	-17,9%	4,5%
50	180	-1,088	-0,936	0,152	-14,0%	6,8%
60	28	0,127	0,128	0,000	0,4%	0,1%
60	32	0,127	0,130	0,003	2,4%	0,7%
60	40	0,124	0,116	-0,008	-6,4%	-1,7%
60	60	0,076	0,091	0,014	18,8%	2,6%
60	90	-0,018	0,004	0,022	-123,2%	3,2%
60	130	-0,228	-0,195	0,034	-14,7%	3,5%
60	180	-0,617	-0,481	0,137	-22,2%	9,4%
60	220	-1,012	-0,929	0,083	-8,2%	4,3%

As maiores diferenças absolutas foram de 0,097 mca para a pressão média na base a montante da comporta, 0,036 mca para a pressão mínima na base do conduto a jusante da comporta e 0,152 mca para a pressão mínima no teto do conduto a jusante da comporta.

4.3.2 VELOCIDADES MÉDIAS NA DIREÇÃO X

A Figura 4.84 apresenta a comparação entre os resultados numéricos e os dados experimentais do perfil de velocidade na direção x no conduto a montante da comporta para a condição de 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão. Neste caso, a velocidade média na entrada do bloco 1 foi determinada igual a 0,553 m/s, para se obter o melhor ajuste das pressões médias no conduto, não tendo sido respeitadas nem a velocidade média decorrente da vazão específica na seção central do conduto, 0,38 m/s, nem a vazão de referência da simulação, 0,512 m/s, da Tabela 3.6. Por isso, observa-se que as velocidades médias na direção x obtidas da simulação numérica foram maiores que as experimentais, resultado da vazão determinada. Contudo, existe coerência entre os formatos dos perfis de velocidade numérico e experimental.

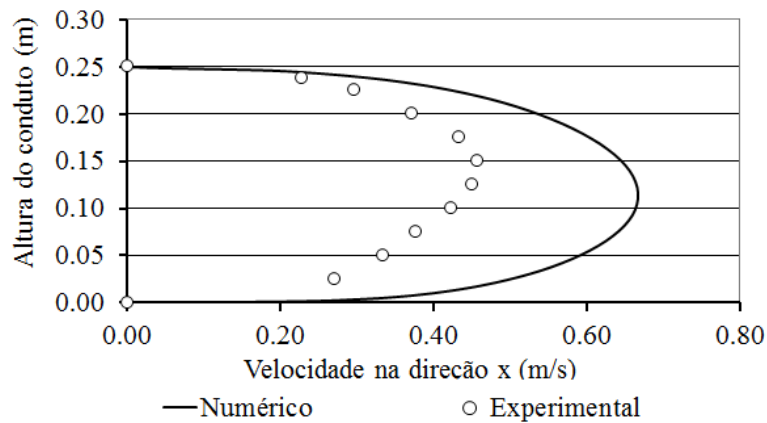


Figura 4.84 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 10% de abertura da comporta e vazão de 32 l/s.

Da Figura 4.85 à Figura 4.89 são apresentadas comparações de outros perfis de velocidade média na direção x, cujos dados experimentais estavam disponíveis.

As velocidades numéricas e experimentais se apresentaram na mesma ordem de grandeza e os melhores ajustes do formato do perfil de velocidades foram obtidos para a vazão de referência de 220 l/s.

Cabe observar que os dados experimentais de velocidade foram obtidos com tubo de Pitot e que há incertezas quanto à precisão dos dados, pela dificuldade de garantir o correto posicionamento do tubo de Pitot no interior da tubulação e de mensurar seu erro.

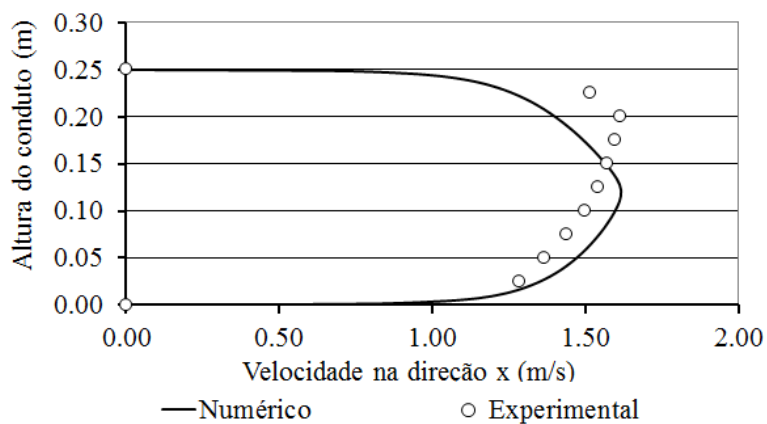


Figura 4.85 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 30% de abertura da comporta e vazão de 90 l/s.

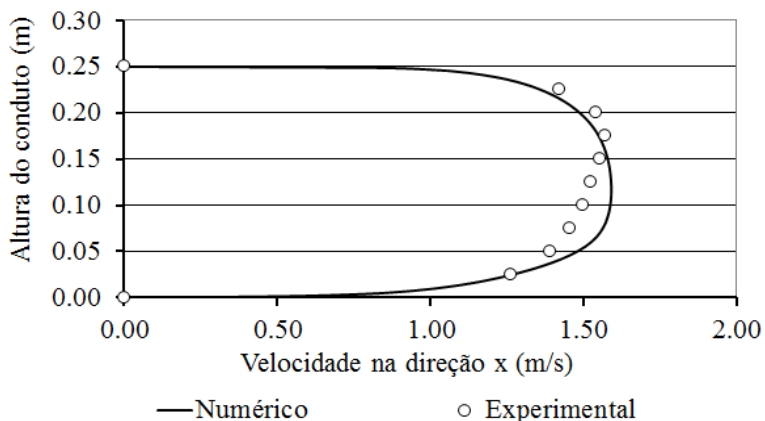


Figura 4.86 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 90 l/s.

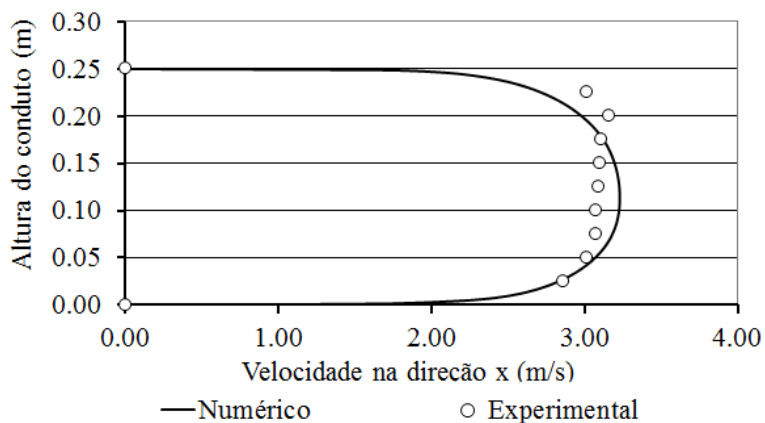


Figura 4.87 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 50% de abertura da comporta e vazão de 180 l/s.

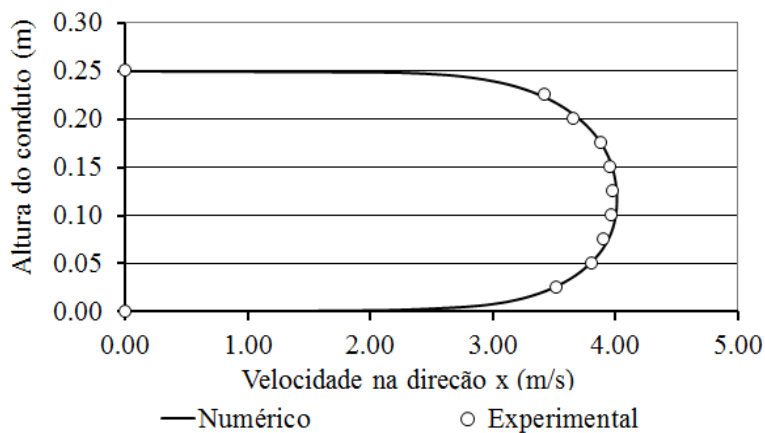


Figura 4.88 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.

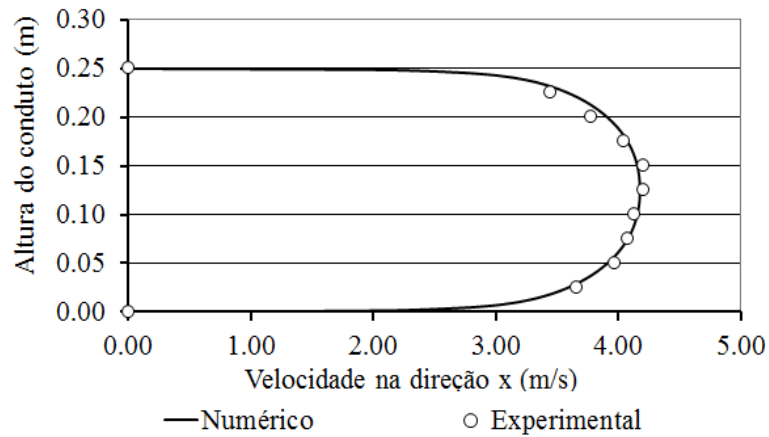


Figura 4.89 - Comparação dos perfis de velocidade média na direção x numérico e experimental para a condição de 100% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.

A partir da comparação entre os dados de pressão média junto ao teto e à base do conduto e de velocidade média na direção x, consideraram-se satisfatórios os resultados das simulações numéricas no *Flow-3D*®, com o modelo de turbulência k- ϵ , para a sequência da análise do comportamento do escoamento médio no interior do conduto.

4.4 COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO MÉDIO NO INTERIOR DO CONDUTO

A partir dos resultados das simulações numéricas do escoamento médio sob a comporta segmentada invertida, realizadas no *Flow-3D®*, foram gerados gráficos do comportamento das linhas de corrente, das pressões, da velocidade na direção x, da velocidade na direção z, da energia cinética turbulenta (TKE) e da dissipação de energia cinética turbulenta (DTKE).

4.4.1 ESCOAMENTO COM A COMPORTA 100% ABERTA

Da Figura 4.90 até a Figura 4.95 são apresentados os resultados obtidos para a simulação da condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência. Os valores máximo e mínimo registrados para cada parâmetro são os limites das escalas apresentadas em cada figura.

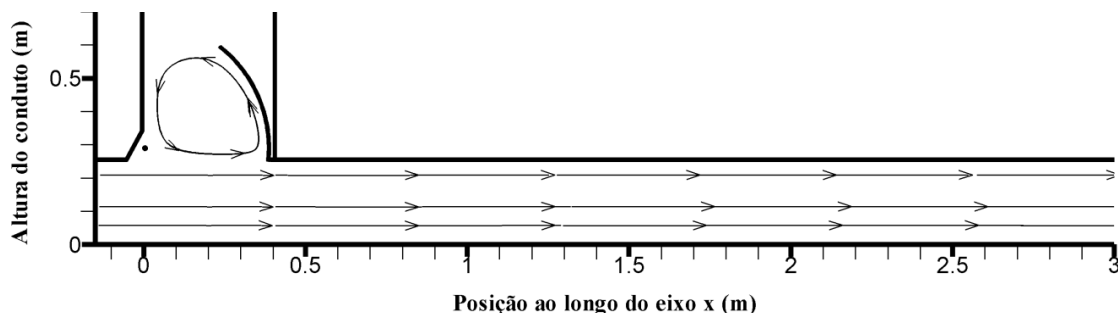


Figura 4.90 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

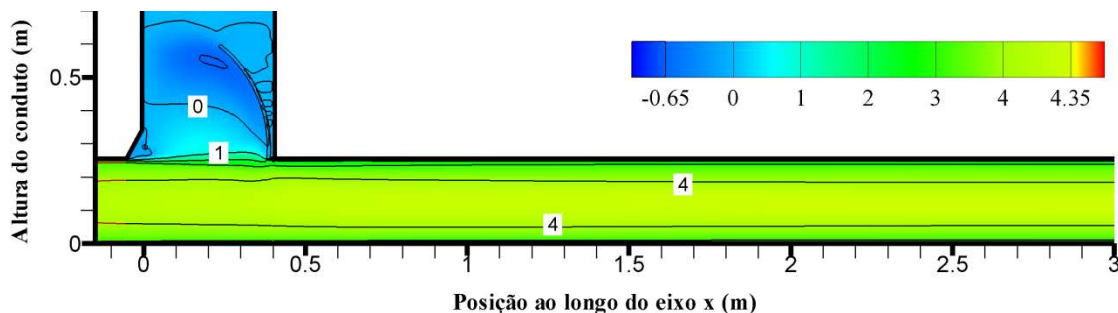


Figura 4.91 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

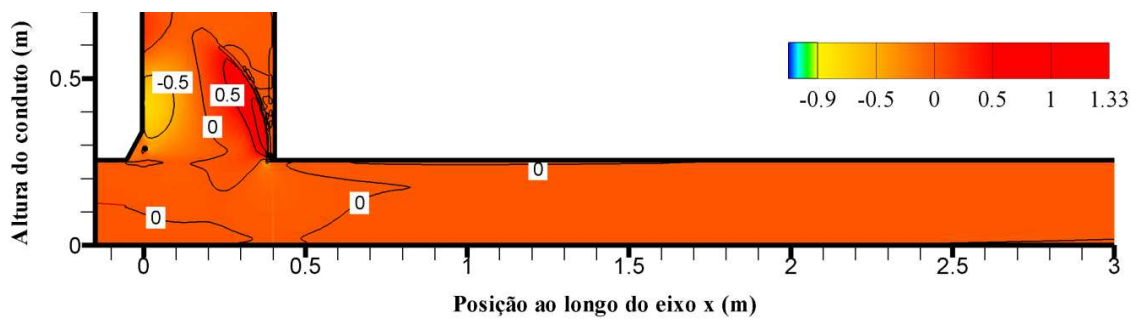


Figura 4.92 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

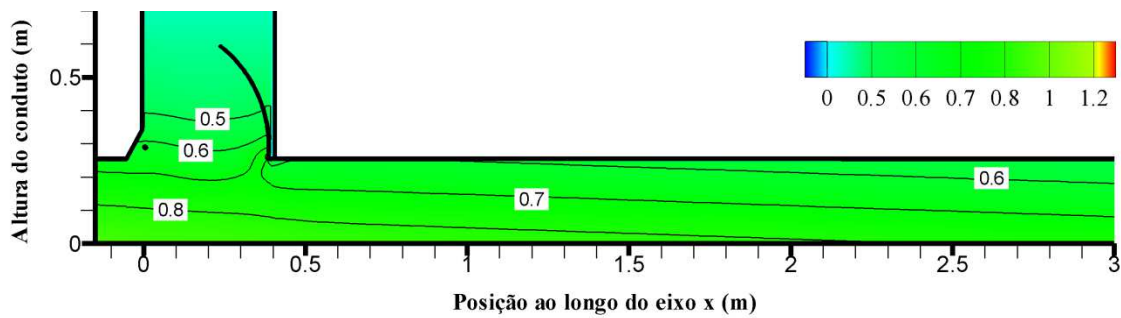


Figura 4.93 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

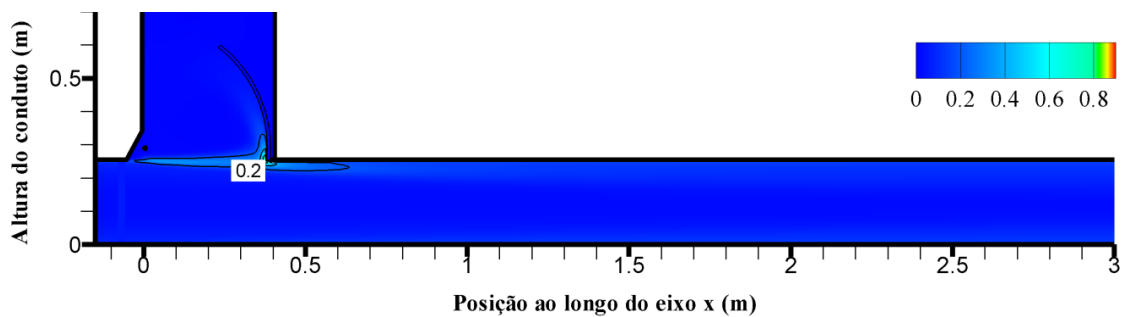


Figura 4.94 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

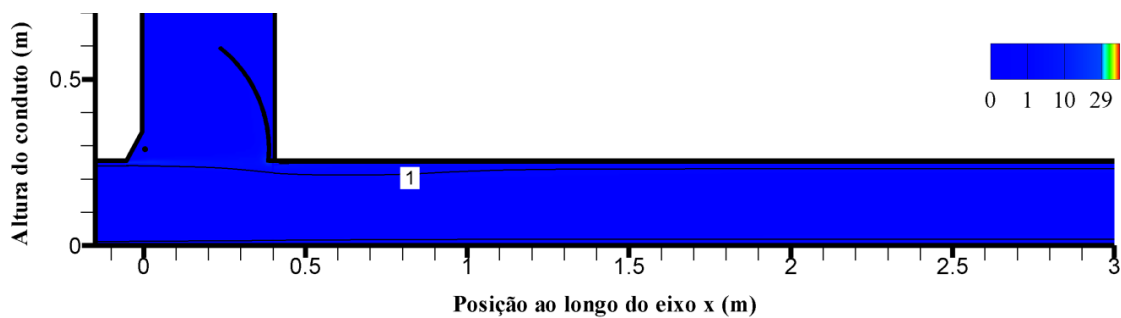


Figura 4.95 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 100% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

A partir dos resultados da simulação numérica do escoamento com a comporta completamente aberta, observa-se, pelo comportamento das linhas de corrente e dos campos de velocidade nas direções x e z, que houve o direcionamento de fluxo para o interior do poço da comporta e a formação de uma recirculação que fica contida nesse local. No conduto, as maiores velocidades na direção x foram registradas na metade na altura.

As linhas isobáricas sofreram influência do poço da comporta, porém pode-se verificar que houve a tendência de decréscimo dos valores das pressões com o aumento da distância a partir desse ponto, devido à perda de carga linear. A formação de um campo de energia cinética turbulenta demonstra o desprendimento de vórtices do teto do conduto para a região do poço da comporta.

4.4.2 ESCOAMENTO COM A COMPORTA PARCIALMENTE ABERTA

Da Figura 4.96 até a Figura 4.119 são apresentados os resultados obtidos para as simulações numéricas com as seguintes condições: 10%, 30%, 50% e 60% de abertura da comporta e respectivas vazões de referência de 32 l/s, 90 l/s e 180 l/s e 220 l/s. Os valores máximo e mínimo registrados para cada parâmetro são os limites das escalas apresentadas em cada figura.

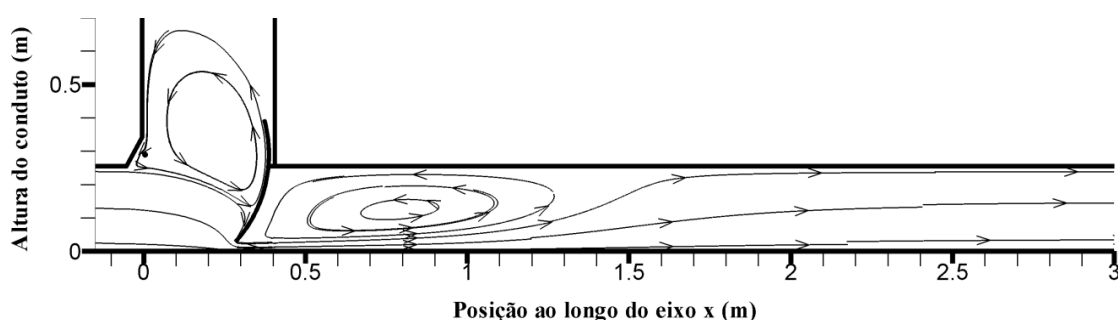


Figura 4.96 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.

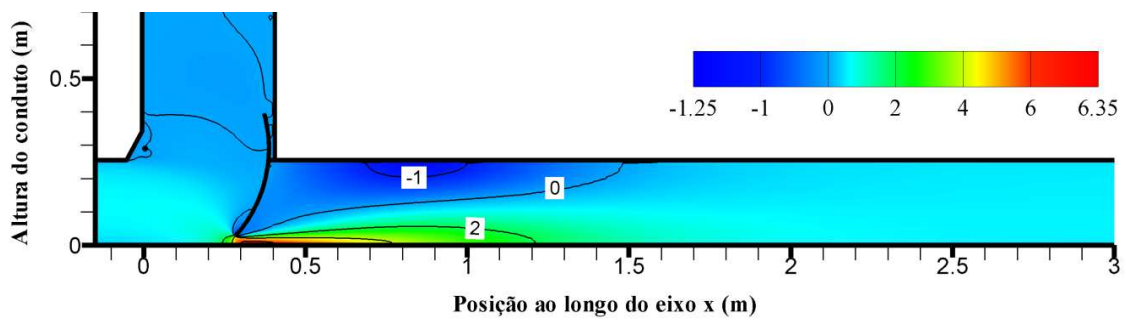


Figura 4.97 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.

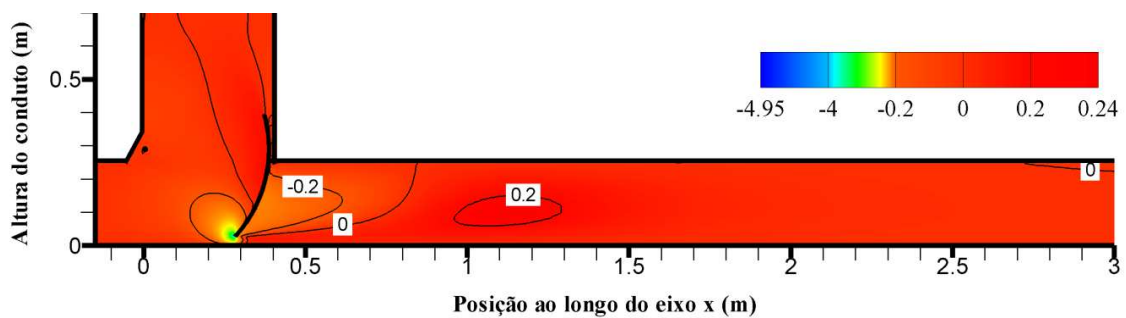


Figura 4.98 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.

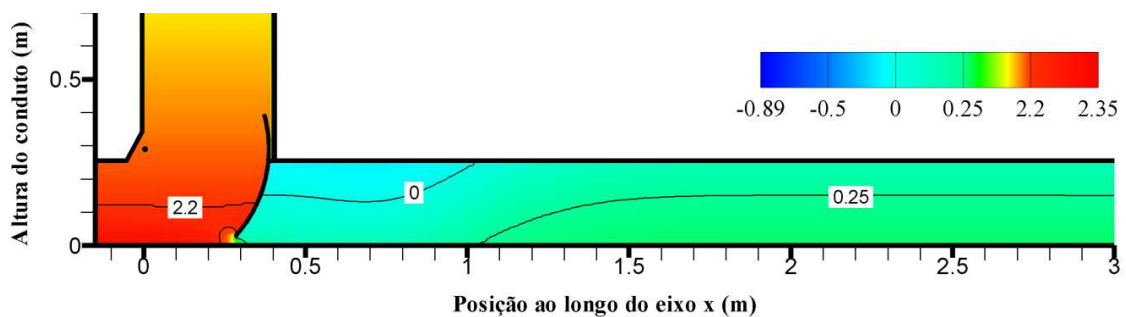


Figura 4.99 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.

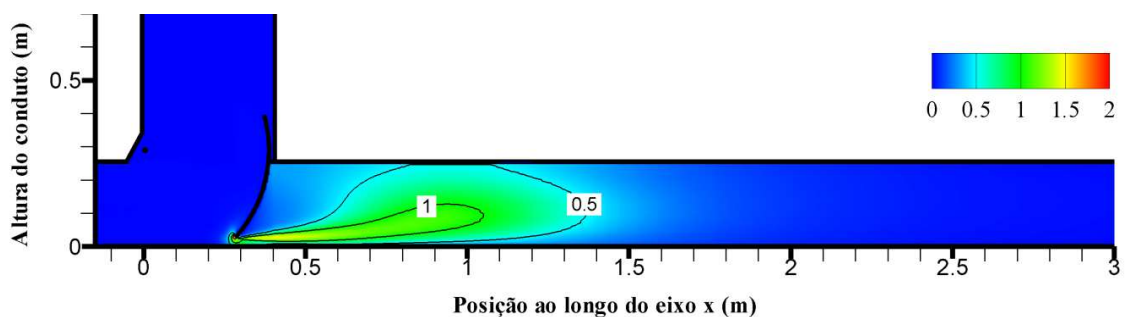


Figura 4.100 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.

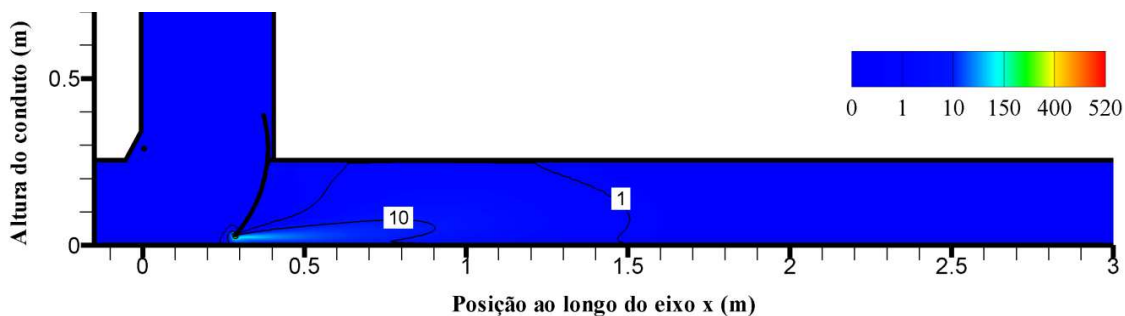


Figura 4.101 - Dissipação de Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.

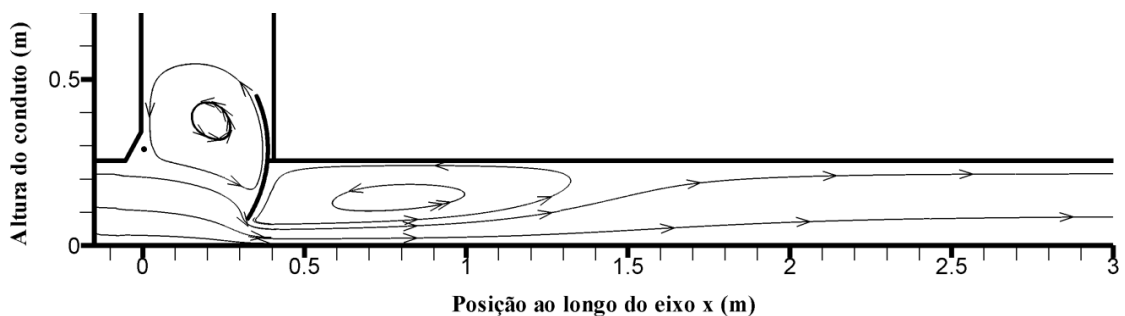


Figura 4.102 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.

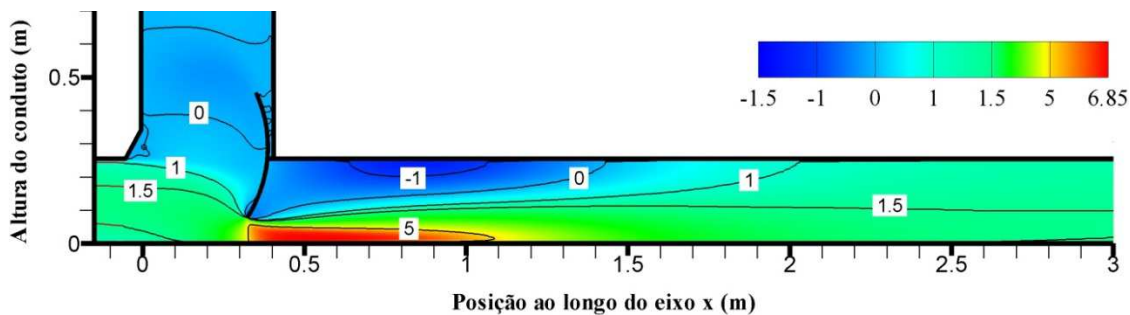


Figura 4.103 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.

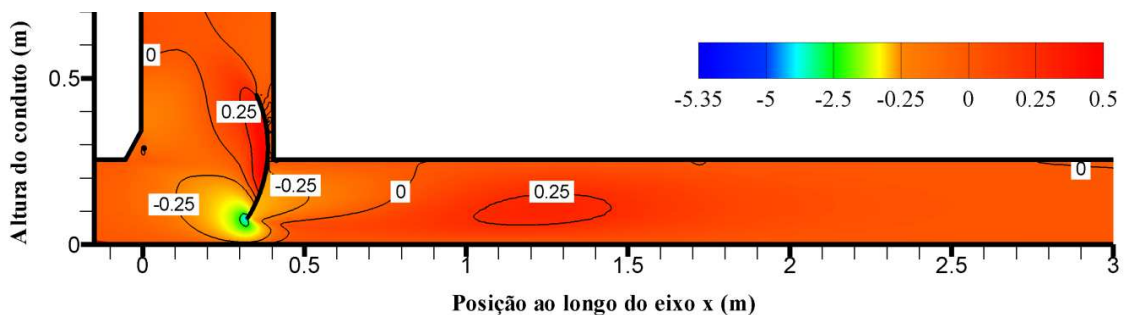


Figura 4.104 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.

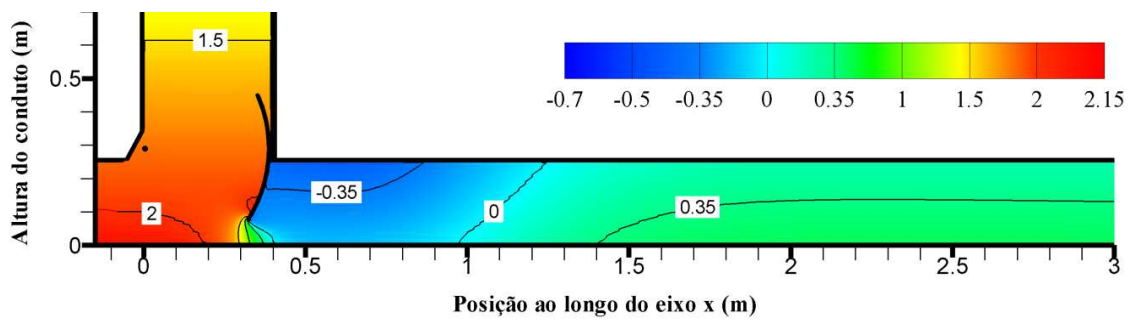


Figura 4.105 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.

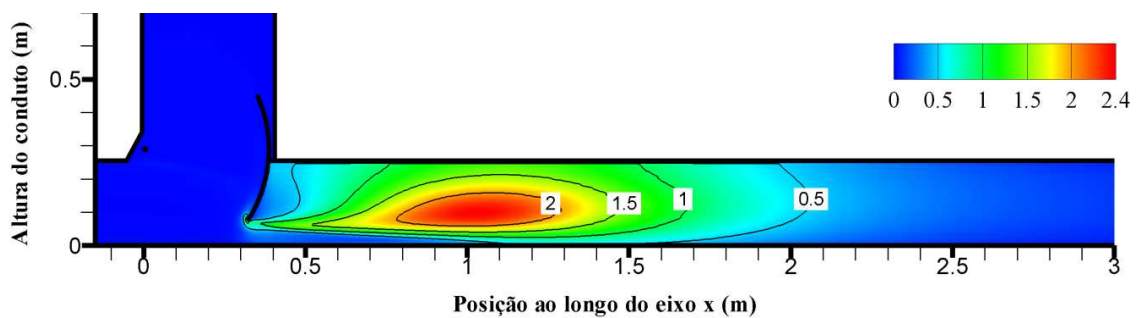


Figura 4.106 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.

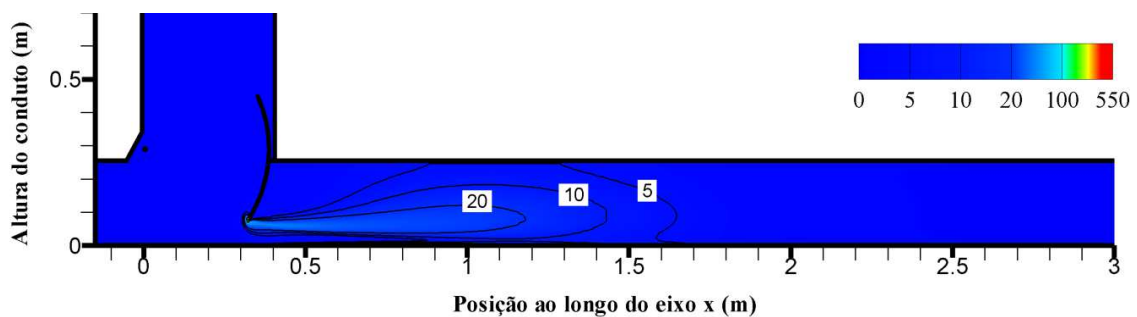


Figura 4.107 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 30% de abertura da comporta e 90 l/s de vazão de referência.



Figura 4.108 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

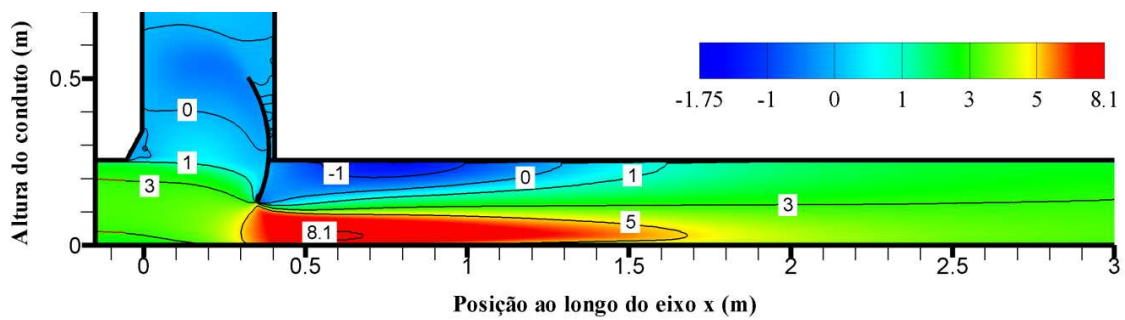


Figura 4.109 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

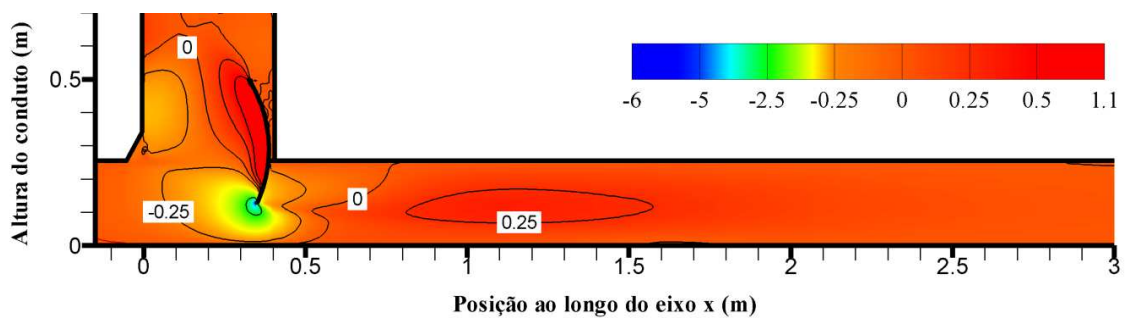


Figura 4.110 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

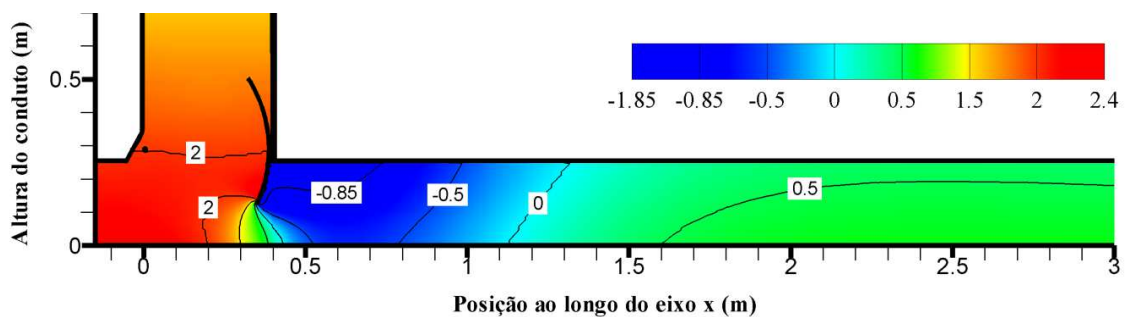


Figura 4.111 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

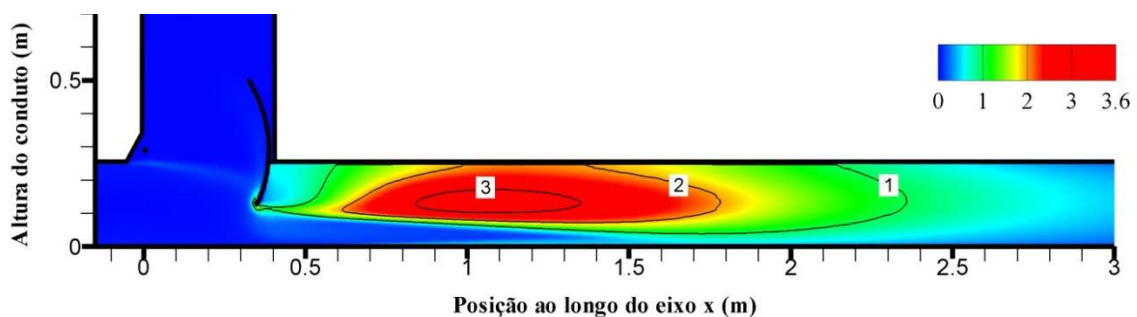


Figura 4.112 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

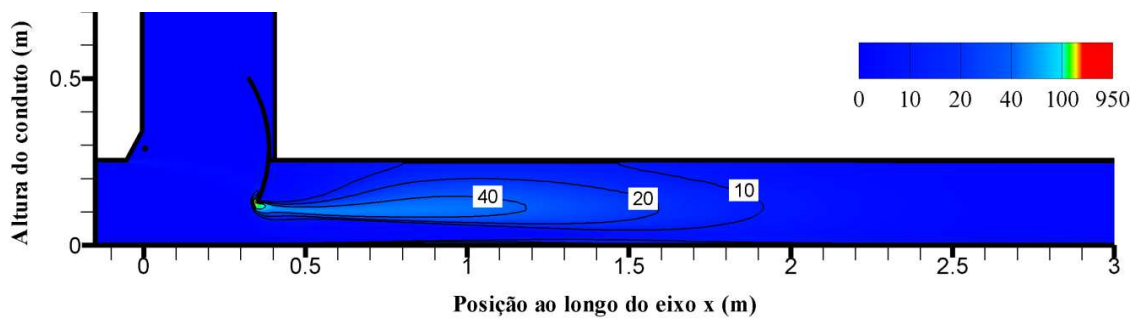


Figura 4.113 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

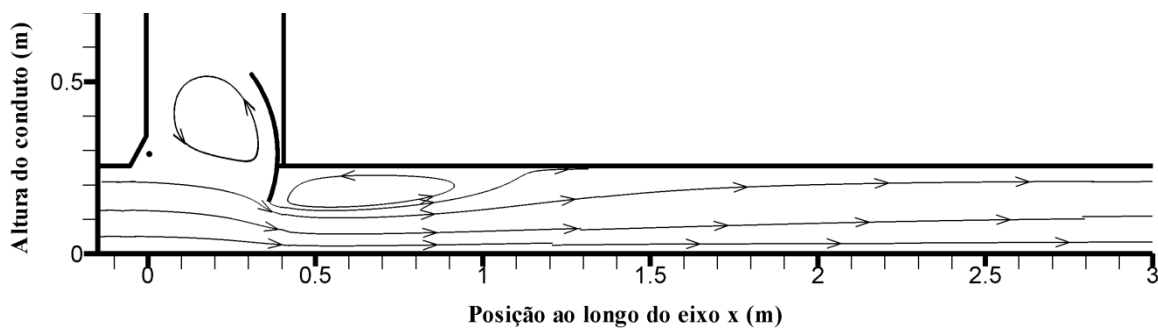


Figura 4.114 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

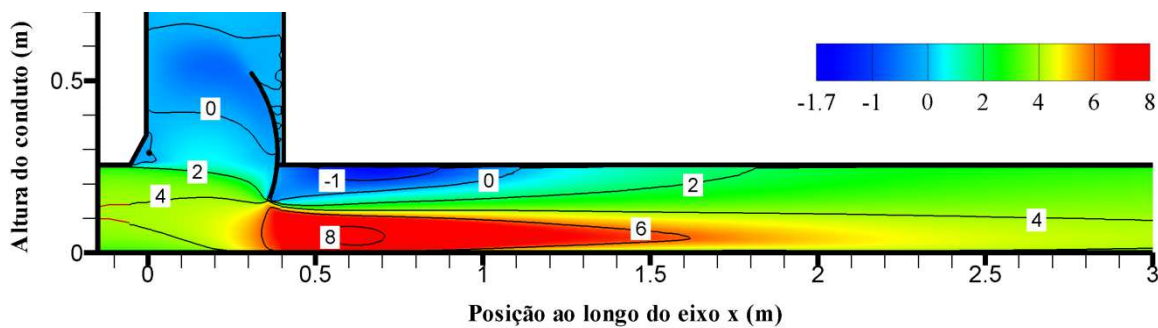


Figura 4.115 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

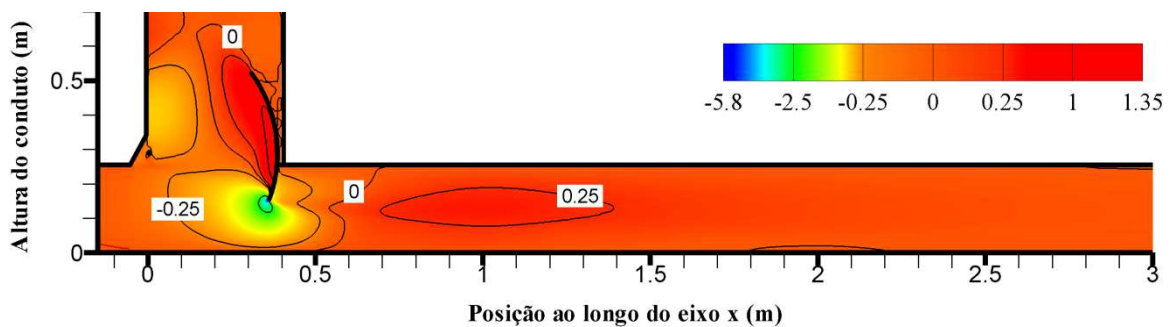


Figura 4.116 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

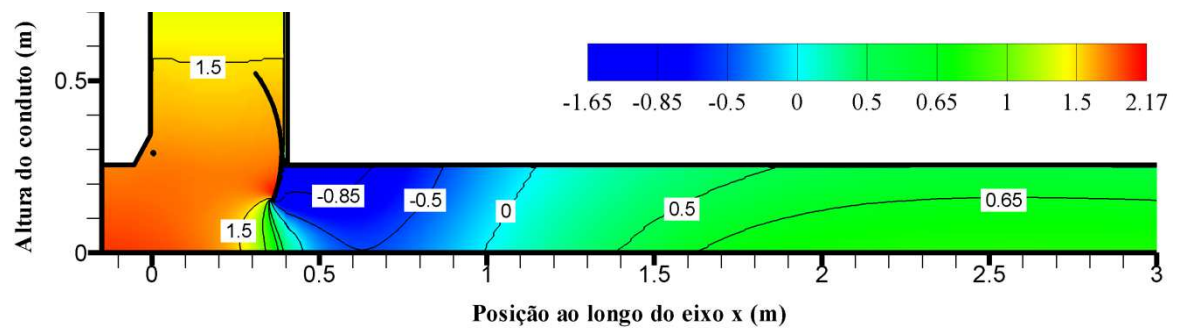


Figura 4.117 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

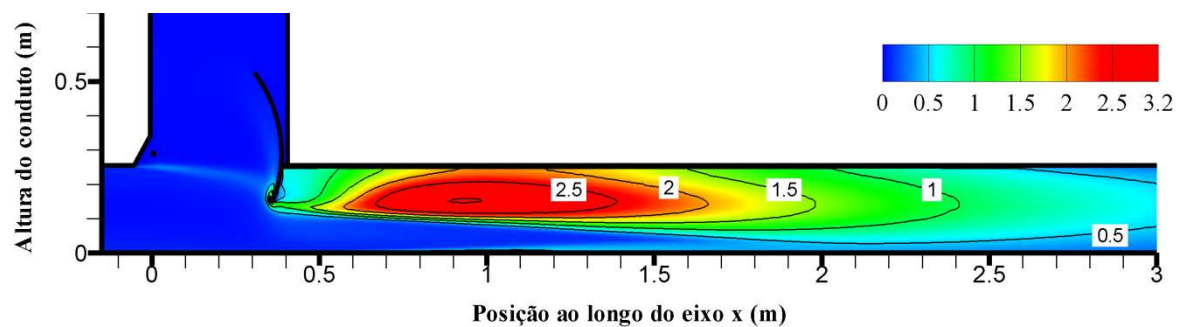


Figura 4.118 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

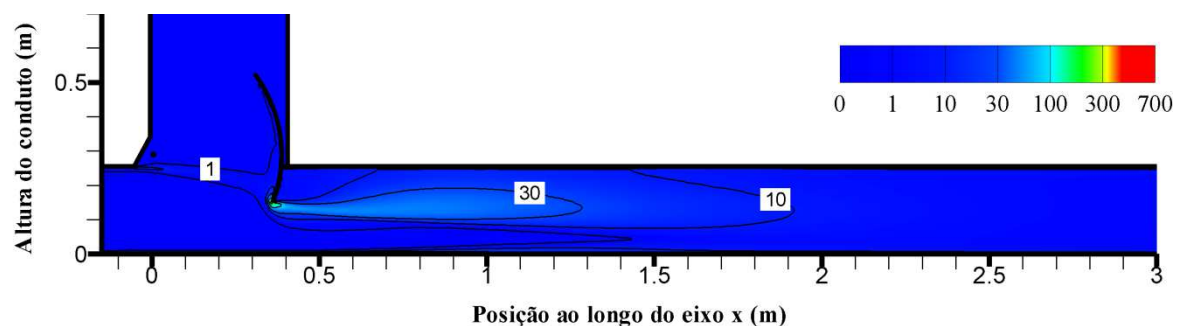


Figura 4.119 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

Para as simulações numéricas de condições com a comporta parcialmente aberta, observa-se que as linhas de corrente caracterizaram o direcionamento do fluxo para a passagem sob a comporta e também a formação de dois grandes vórtices: um a montante da comporta, gerado pelo impacto e redirecionamento do fluxo por essa estrutura; e outro a jusante da comporta, gerado em função do diferencial de velocidades entre o

escoamento que passa sob a comporta e a porção de fluido que se localiza próxima ao teto a jusante da comporta.

A Figura 4.120 demonstra as similaridades do comportamento do escoamento em estudo como o do jato parietal submerso apresentado por DEY *et al.* (2010). As diferenças entre esses escoamentos decorrem da existência do teto do conduto, que gera o confinamento do fluxo. Enquanto no jato parietal submerso ocorre o abaixamento do nível de água a jusante da comporta, no escoamento confinado verificou-se o registro de pressões mais baixas junto ao teto próximo à comporta.

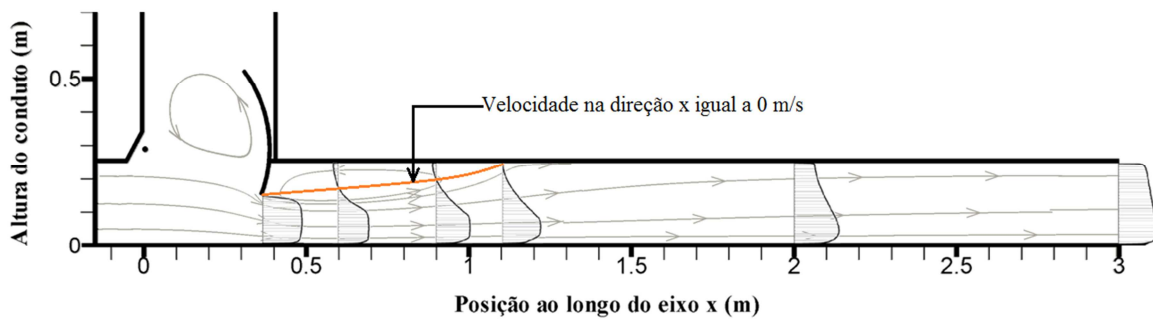


Figura 4.120 - Comportamento das linhas de corrente comparadas com os perfis de velocidade média na direção x - Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

A Figura 4.121 mostra os valores dos perfis de velocidade média na direção x utilizados na Figura 4.120.

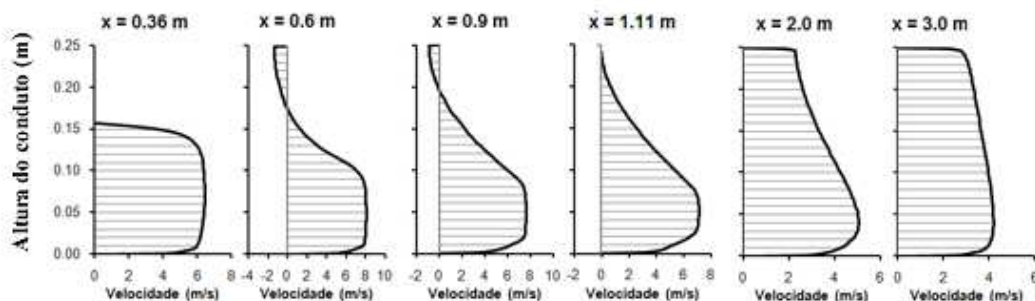


Figura 4.121 - Valores dos perfis de velocidade média na direção x - Resultados numéricos para a condição com 60% de abertura da comporta e 220 l/s de vazão de referência.

Da análise da Figura 4.121 verifica-se que o perfil de velocidade média na direção x na seção $x = 0,36\text{m}$, sob o terminal da comporta, apresentou uma distribuição uniforme de velocidades com variações próximas à base, devido à influência da camada limite, e à comporta, em função da contração induzida pela inércia do movimento das partículas de fluido para a passagem do escoamento sob a comporta. Com o aumento da distância a partir da comporta na direção x , evidenciaram-se as velocidades negativas próximas ao teto e aumentaram as velocidades próximas à base enquanto há conversão de energia potencial em cinética. A maior velocidade na direção x ocorreu na posição $x = 0,6\text{ m}$ e $z = 0,05\text{ m}$. A partir daí a energia cinética passou a ser convertida em energia potencial e as pressões se elevaram. Para esse caso a velocidade junto ao teto passou a ser positiva a partir da posição $1,11\text{ m}$, indicando o final da recirculação. Os próximos perfis de velocidade demonstram a continuidade do desenvolvimento do escoamento no conduto, com a dissipação da influência da comporta e o predomínio da influência das paredes.

De forma geral, as máximas velocidades positivas na direção x ocorreram na região do jato, em um campo de velocidades de formato cônico, e os máximos valores foram atingidos na seção da *vena contracta*. As máximas velocidades negativas na direção x ocorreram nas proximidades do teto do conduto a jusante da comporta, no encontro com a isolinha de velocidade na direção z igual a 0 m/s , na região de recirculação do escoamento. O ponto de encontro da isolinha de velocidade na direção x igual a 0 m/s com o teto do conduto caracterizou o limite da zona de recirculação na direção x . A Figura 4.122 permite visualizar em uma mesma representação as linhas de corrente e as isolinhas de velocidade nas direções x e z , para a condição de 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência, de forma a auxiliar no entendimento dessas observações.

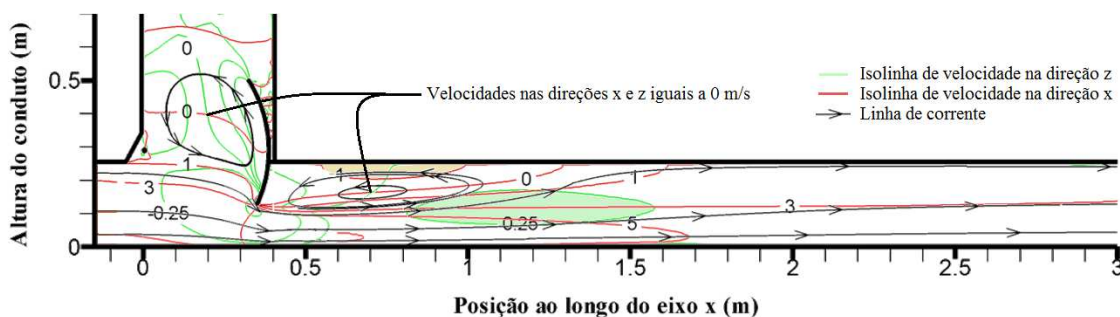


Figura 4.122 - Linhas de corrente e isolinhas de velocidade média nas direções x e z para a condição de 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

Os campos de velocidade na direção z demonstram que as maiores velocidades ascendentes e descendentes decorreram do impacto do escoamento com a comporta. A jusante da comporta ficou caracterizada uma região de velocidade ascendente na área de expansão do jato e uma região de velocidade descendente nas proximidades da face de jusante da comporta.

O cruzamento entre as isolinhas de velocidade nas direções x e z igual a 0 m/s caracterizou o centro dos vórtices de recirculação do escoamento a montante e a jusante da comporta.

O comportamento das linhas isobáricas evidenciou a perda de energia potencial causada pela comporta e a zona com as menores pressões próxima ao teto do conduto a jusante da comporta. De forma comparativa entre as condições apresentadas, a perda de energia potencial ocorreu de forma mais brusca, limitando-se à área do terminal da comporta, na condição com 10% de abertura da comporta e 32 l/s de vazão de referência.

A energia cinética turbulenta indica a intensidade de turbulência do escoamento. Observa-se que a comporta parcialmente aberta provocou a formação de campos de energia cinética turbulenta que tenderam a se expandir em direção ao teto do conduto, preservando uma área, de formato cônico e próxima à comporta e à base do conduto, com energias próximas de $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Os maiores valores de energia cinética turbulenta foram observados nas regiões que abrangem a expansão do jato e a área de alimentação da recirculação a jusante da comporta, as áreas com maiores flutuações do campo de velocidades por unidade de massa.

Na Figura 4.112e na Figura 4.118 é visível a formação de um campo de energia cinética turbulenta que demonstra o desprendimento de vórtices do teto do conduto a montante do poço da comporta em direção ao terminal da comporta, o que pode ser uma fonte causadora de vibrações nesta estrutura.

A Figura 4.123 permite visualizar em uma mesma representação as linhas de corrente e o campo de energia cinética turbulenta, para a condição de 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência, de forma a auxiliar na visualização dessas observações.

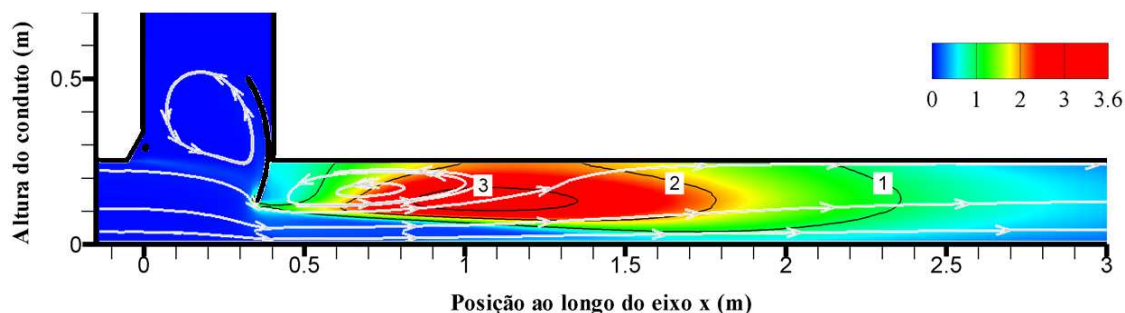


Figura 4.123 - Linhas de corrente e energia cinética turbulenta média – TKE, para a condição de 50% de abertura da comporta e 180 l/s de vazão de referência.

Os maiores valores de dissipação de energia cinética turbulenta, para os casos com a comporta parcialmente aberta, foram observados próximos à comporta e na zona de contato entre o jato e a recirculação.

4.4.3 INFLUÊNCIA DA VAZÃO NO ESCOAMENTO COM A COMPORTA PARCIALMENTE ABERTA – CASO COM 60% DE ABERTURA

Na sequência, são apresentados os gráficos gerados a partir das simulações numéricas das condições com a comporta aberta 60% e as vazões de 28 l/s, 32 l/s, 40 l/s, 60 l/s, 90 l/s, 130 l/s, 180 l/s e 220 l/s. Os resultados demonstraram a influência da vazão no comportamento das linhas de corrente (Figura 4.124), da velocidade na direção x (Figura 4.125), da velocidade na direção z (Figura 4.126), das pressões (Figura 4.127), da energia cinética turbulenta (Figura 4.128) e da dissipação de energia cinética turbulenta (Figura 4.129). As escalas de cor para cada parâmetro foram mantidas iguais àquelas da condição de maior vazão para auxiliar na interpretação visual.

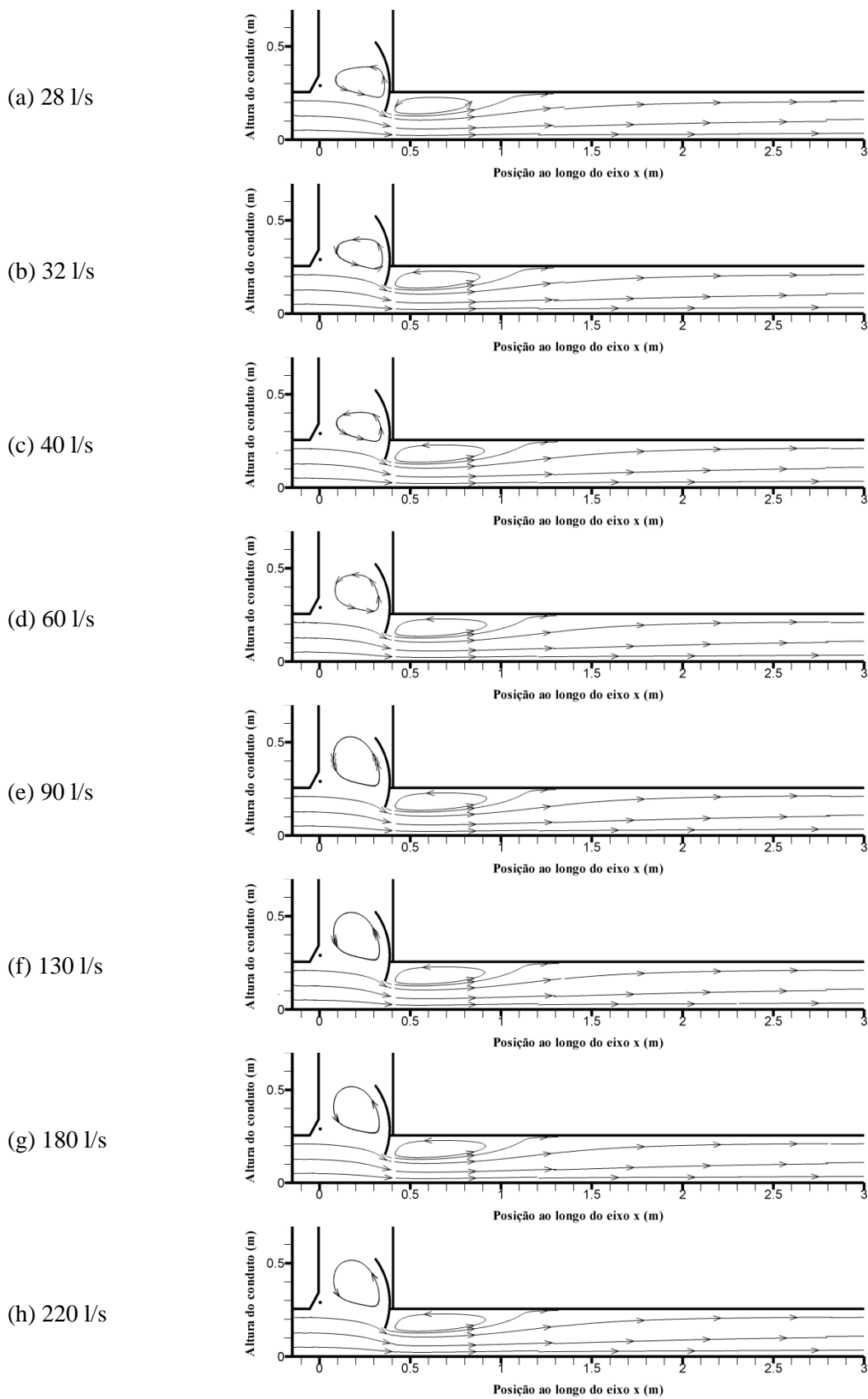


Figura 4.124 - Linhas de corrente – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.

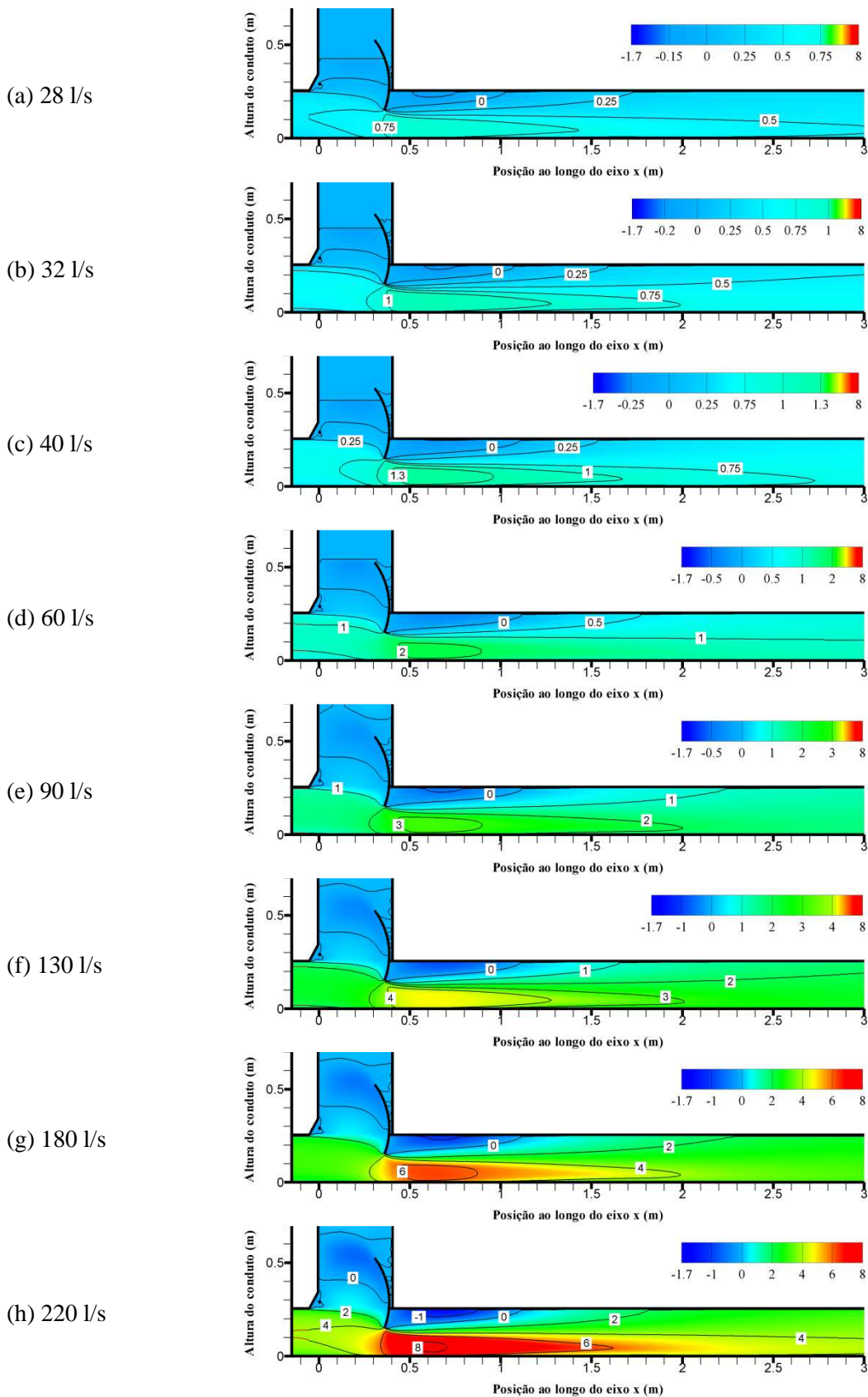


Figura 4.125 - Velocidade média, em m/s, na direção x – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.

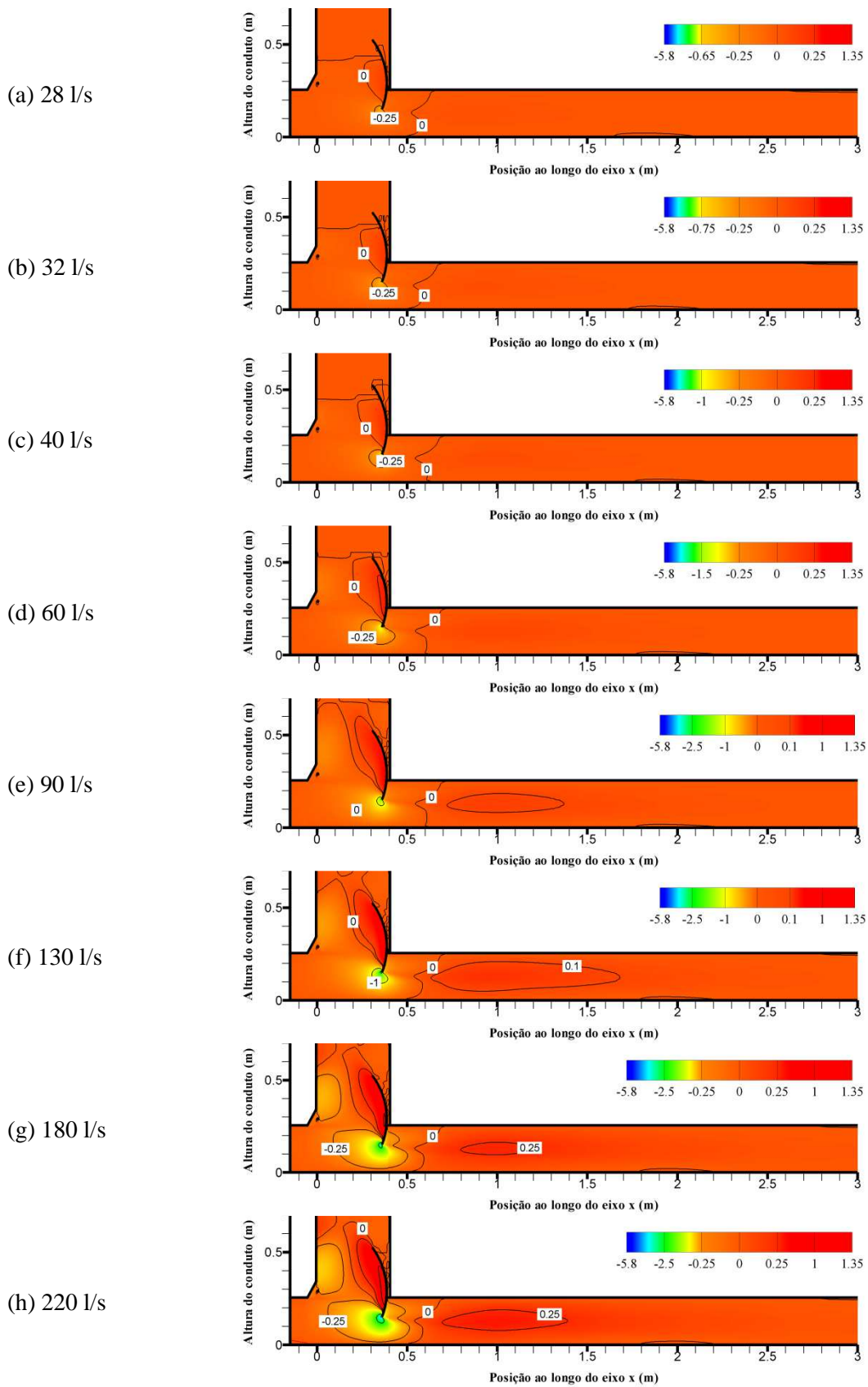


Figura 4.126 - Velocidade média, em m/s, na direção z – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.

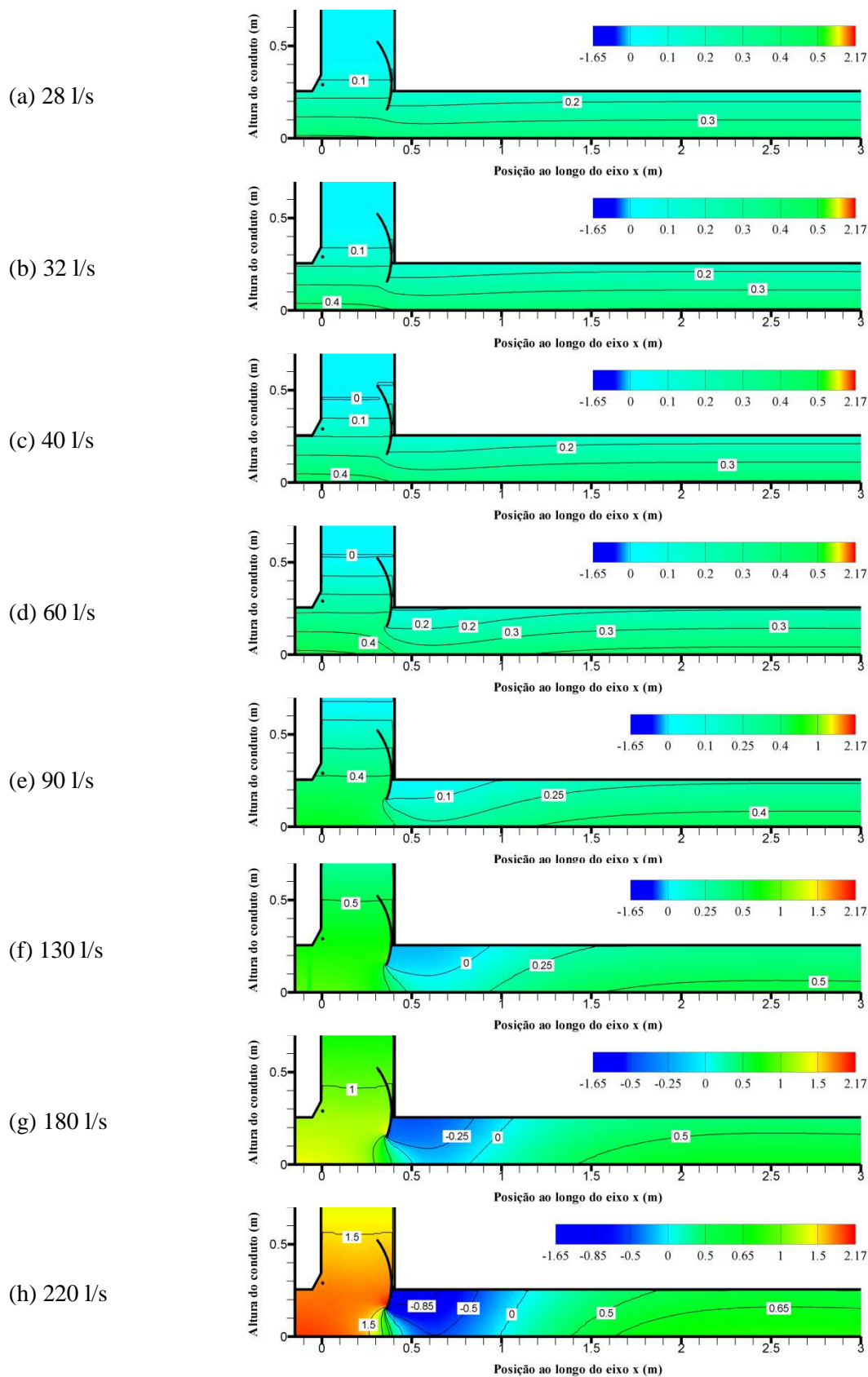


Figura 4.127 - Pressão média, em mca – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.

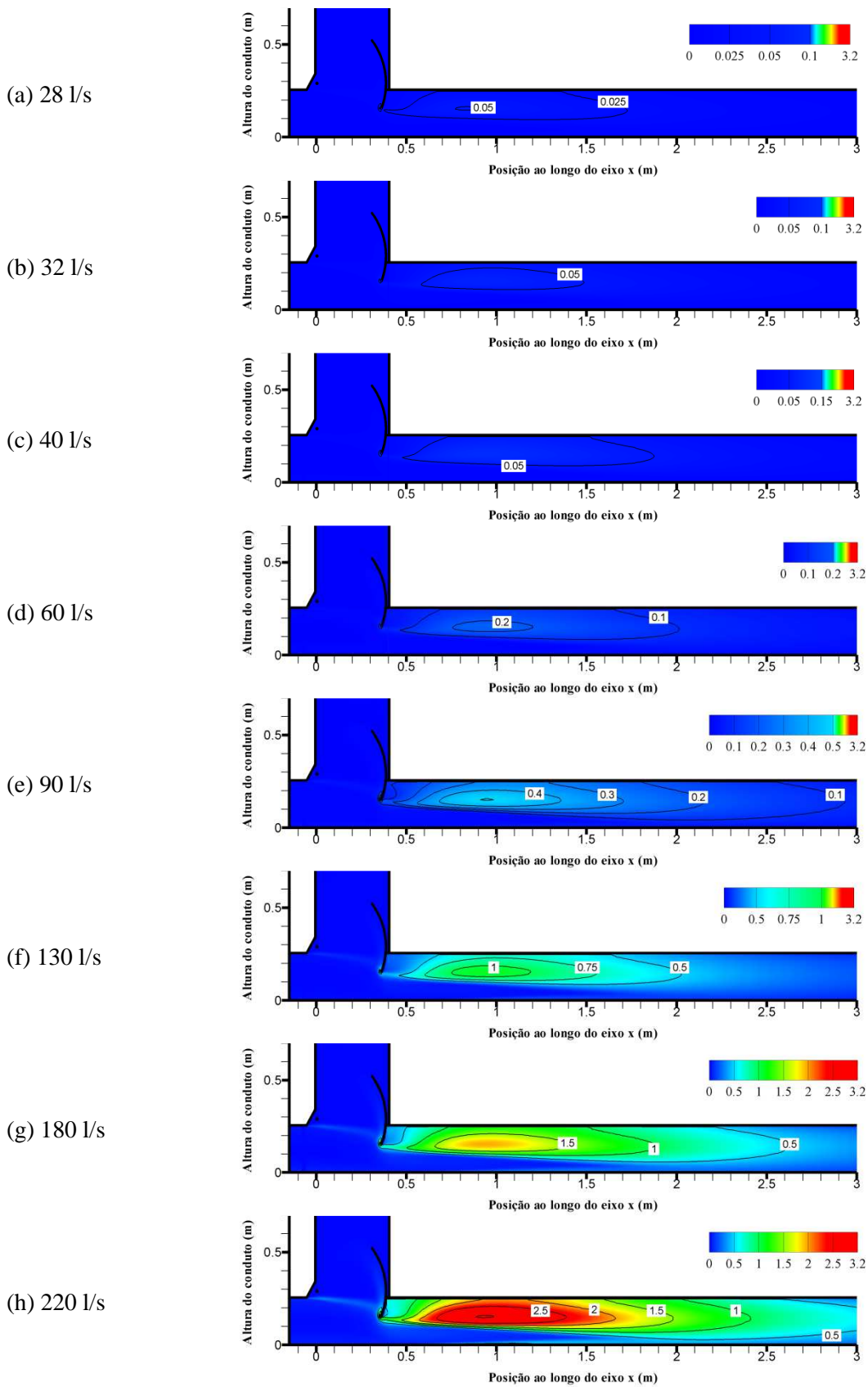


Figura 4.128 - Energia Cinética Turbulenta média - TKE, em m^2/s^2 – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.

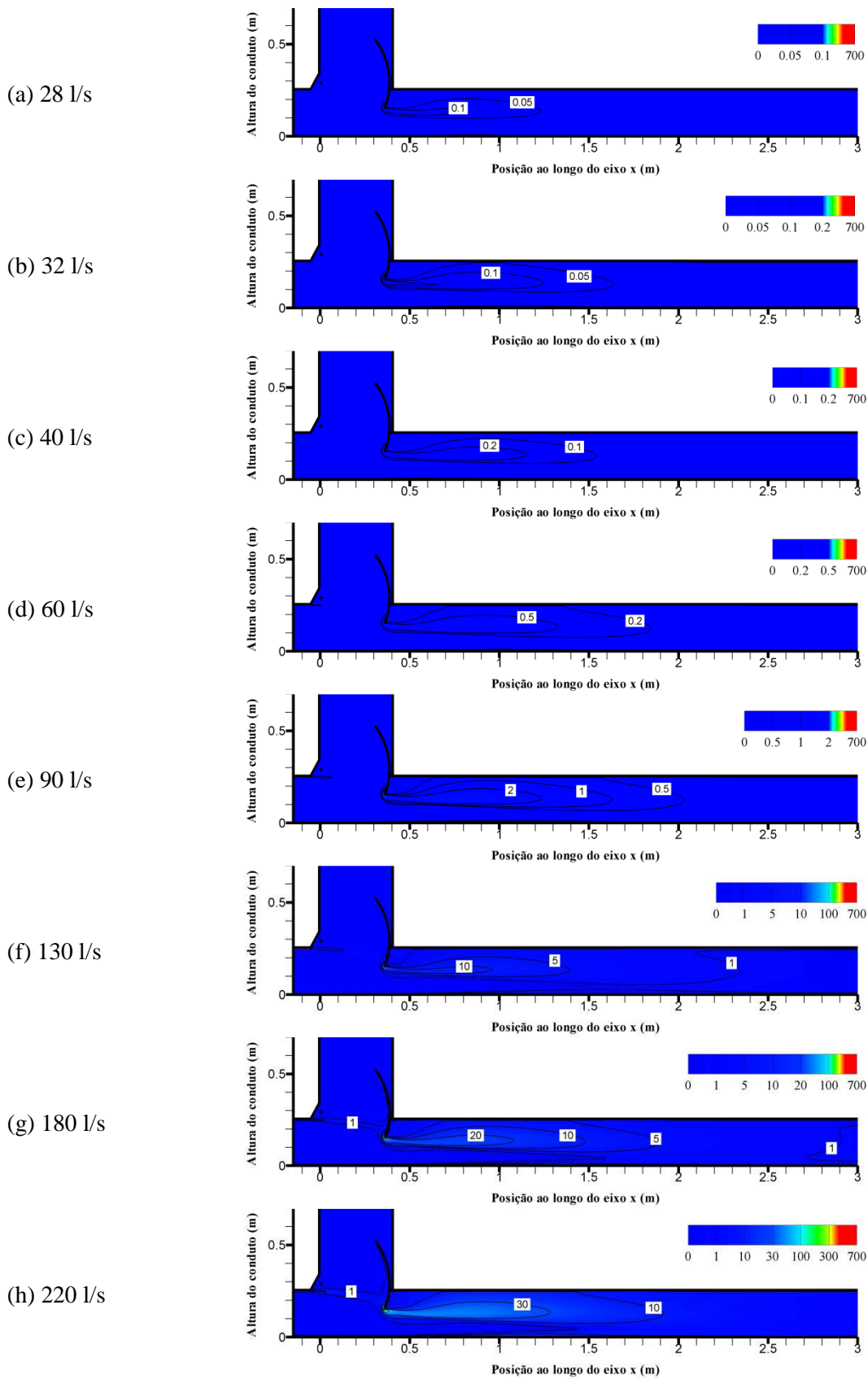


Figura 4.129 - Dissipação de TKE média, em m^2/s^3 – Resultados numéricos para as simulações das condições com 60% de abertura da comporta.

Os gráficos das linhas de corrente demonstram que os comportamentos foram similares para todas as vazões, sem alterações visuais de tamanho do vórtice a jusante da comporta ou do comportamento do fluxo através da comporta. Apenas o vórtice a montante da comporta apresentou tamanho reduzido para as menores vazões, em função do nível de água no poço da comporta, que é menor.

Os gráficos demonstram que ocorreu o aumento dos valores das velocidades na direção x e na direção z com o aumento da vazão. A Figura 4.130 apresenta a relação entre a maior velocidade na direção x encontrada nas simulações numéricas e a vazão de referência.

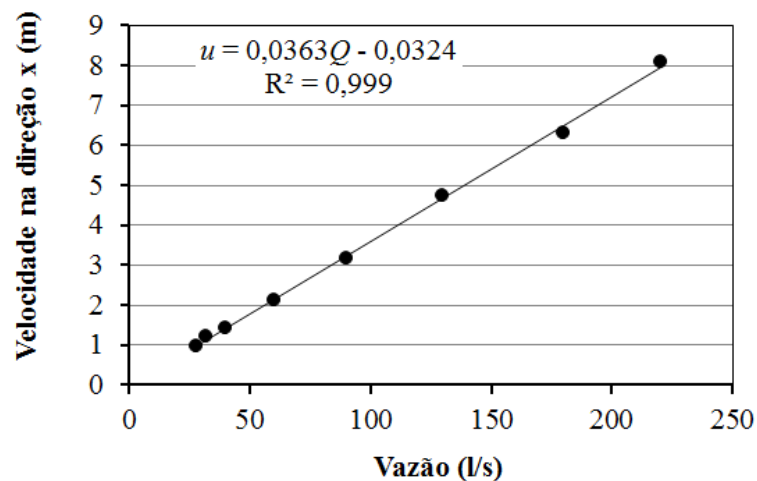


Figura 4.130 - Relação entre a maior velocidade média na direção x (u) encontrada nas simulações numéricas e a vazão de referência (Q).

A Figura 4.131 mostra a posição da maior velocidade na direção x obtida nas simulações numéricas realizadas para a comporta com 60% de abertura. Também se verifica que a partir da vazão 40 l/s existiu a tendência de a maior velocidade na direção x ocorrer na mesma posição. Para todas as vazões simuladas a maior velocidade na direção x ocorreu na altura $z = 0,05$ m, que equivale a 1/3 da altura sob a comporta (60% de abertura correspondem a 15 cm na estrutura em estudo).

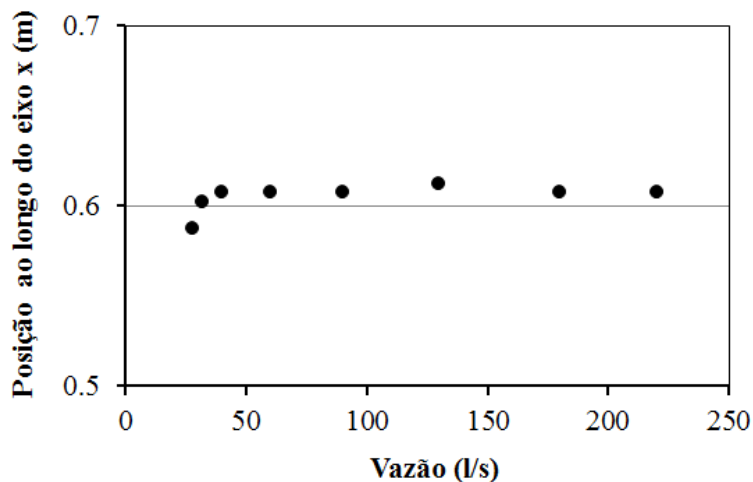


Figura 4.131 - Posição da maior velocidade média na direção x obtida nas simulações numéricas realizadas para a comporta com 60% de abertura.

A Figura 4.132 apresenta a posição da inversão de velocidades na direção x junto ao teto para as simulações numéricas realizadas para a comporta com 60% de abertura. Verifica-se que a partir da vazão 40 l/s houve a tendência de a recirculação apresentar um tamanho constante.

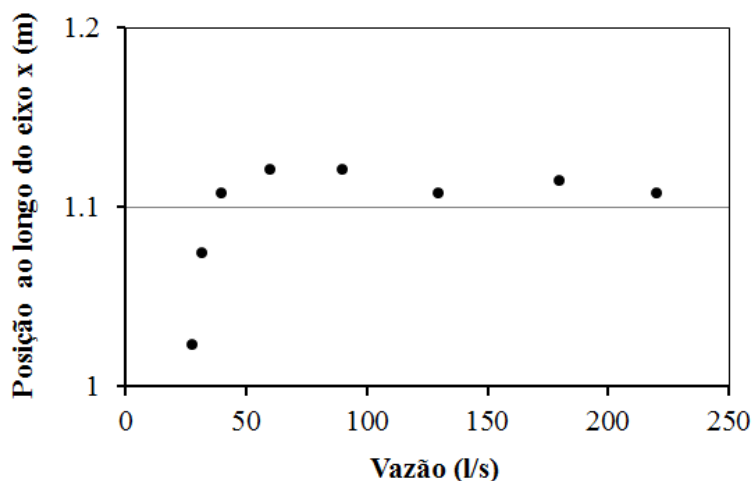


Figura 4.132 - Posição da inversão de velocidades médias na direção x junto ao teto para as simulações numéricas realizadas para a comporta com 60% de abertura.

Para as menores vazões os campos de velocidade apresentaram menores variações, na ordem de cm/s, enquanto que para as maiores vazões as diferenças foram da ordem de m/s. Essas variações foram refletidas na intensidade de turbulência do escoamento e nos campos de energia cinética turbulenta, que apresentaram valores maiores para as maiores velocidades.

Com o aumento da vazão verificou-se o aumento dos valores de energia cinética turbulenta, passando o valor máximo calculado de 0,05 m²/s², na simulação de 28 l/s, para 3,2 m²/s², na simulação de 220 l/s. O campo de energia cinética turbulenta que se desenvolveu do teto do conduto de montante em direção ao terminal da comporta se tornou mais intenso com o aumento da vazão, assim como a dissipação de energia cinética turbulenta, observada na região próxima à comporta e na zona de contato entre o jato e a recirculação.

Com o aumento da vazão as linhas isobáricas ficaram bastante próximas na área sob a comporta, evidenciando a conversão da energia potencial em cinética em um curto espaço físico, e a zona dos menores valores de pressão se expandiu do teto até a base do conduto. O aumento da vazão, além de influenciar os valores extremos das pressões, alterou o comportamento das linhas isobáricas. A partir de 60 l/s começou a se configurar o formato curvo para as linhas isobáricas, que lembra o formato do “símbolo de raiz” ($\sqrt{\quad}$).

4.4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ÁREAS DA ESTRUTURA SUBMETIDAS ÀS MAIORES SOLICITAÇÕES

Para investigar as áreas de maior solicitação da estrutura a jusante de comportas de controle de fluxo em eclusas de navegação, os dados de pressão e de velocidade média calculados no *Flow-3D*® foram transpostos para escala de protótipo, considerando-se uma escala geométrica de 1:16 e as relações de escala de semelhança apresentadas na Tabela 2.1.

Da Figura 4.133 até a Figura 4.136 são apresentados os valores de pressões e velocidades médias em escala de protótipo para as condições 10%, 30%, 50% e 60% de abertura da comporta. Foram transpostos para escala de protótipo os dados das simulações

com as maiores vazões, quais sejam 32 l/s, 90 l/s, 180 l/s e 220 l/s em escala de modelo. Os limites das escalas apresentados em cada figura representam os valores máximos e mínimos calculados para cada condição.

Para comparação, a pressão relativa de vapor da água pura, a 20°C e nível do mar, foi considerada igual a -10,09 mca, valor que corresponde à pressão absoluta de vapor de água (0,24 mca) menos a pressão atmosférica absoluta (10,33 mca). O valor de -10,09 mca é o valor de referência para o desencadeamento do fenômeno de cavitação. Ainda, de acordo com Falvey (1990), é prudente investigar a possibilidade de cavitação para velocidades superiores a 10 m/s.

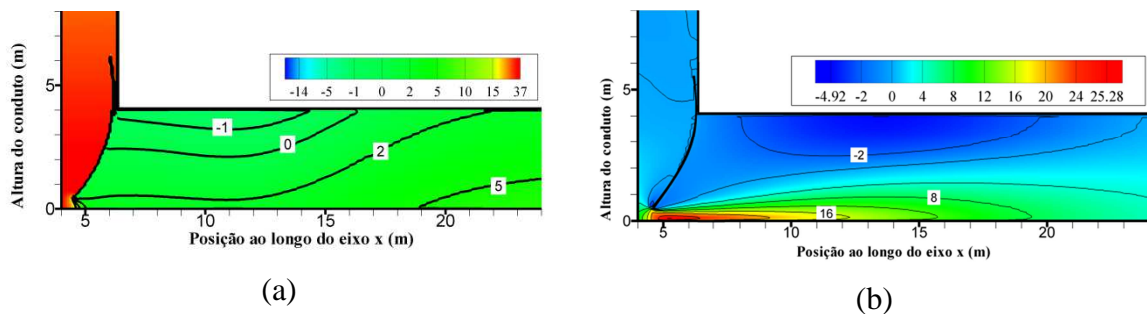


Figura 4.133 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 10% de abertura da comporta, 33 m³/s e 30 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.

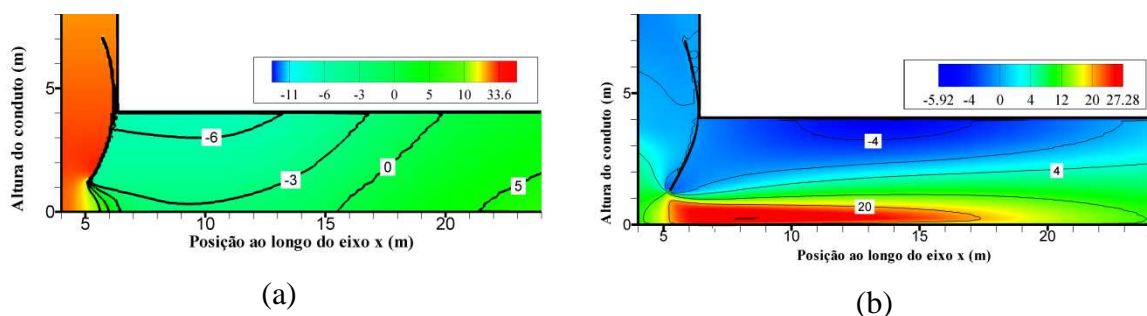


Figura 4.134 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 30% de abertura da comporta, 92 m³/s e 27 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.

Para as condições avaliadas com 10% e 30% de abertura da comporta, as zonas com pressões capazes de desencadear o fenômeno da cavitação concentraram-se junto ao

terminal da comporta com área pequena a ponto de não ser perceptível nas figuras. A partir do terminal da comporta o fluxo carregaria as cavidades de vapor para zonas com pressões capazes de causar seu colapso. Nesses casos, acredita-se que as paredes laterais do conduto seriam expostas ao colapso das cavidades de vapor que se formariam.

A região do jato junto à base do conduto a jusante da comporta, para as condições avaliadas com 10% e 30% de abertura da comporta, apresentaram velocidades superiores a 25 m/s, demandando atenção especial para a prevenção de danos à estrutura.

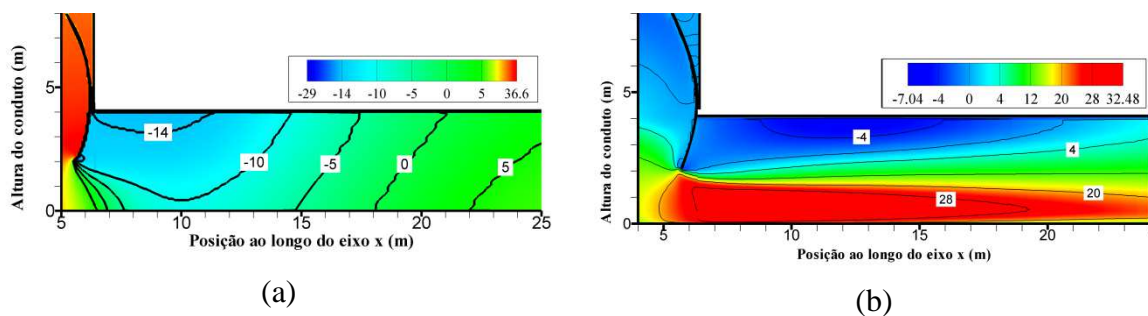


Figura 4.135 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 50% de abertura da comporta, 184 m³/s e 26 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.

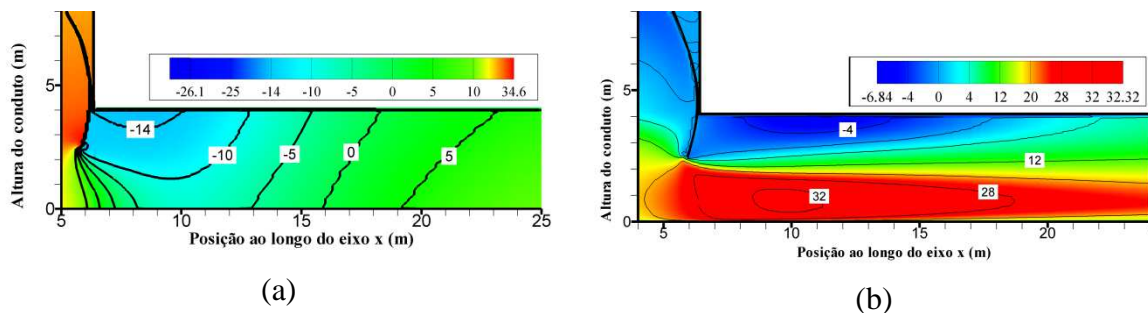


Figura 4.136 - (a) Pressões médias em escala de protótipo. (b) Velocidades médias na direção x em escala de protótipo. Condição equivalente a 60% de abertura da comporta, 225 m³/s e 19 mca de diferencial de pressão entre montante e jusante da comporta.

Para os casos avaliados com 50% e 60% de abertura da comporta, as zonas com pressões capazes de desencadear o fenômeno da cavitação abrangeram as áreas que vão do terminal ao teto a jusante da comporta. Considerando as linhas de corrente do escoamento, as cavidades de vapor que se formariam na região de recirculação do escoamento seriam

misturadas ao jato e teriam a tendência de serem lançadas contra o teto do conduto pela expansão do jato e pela própria recirculação. As velocidades calculadas foram superiores a 32 m/s na região do jato junto à base do conduto a jusante da comporta.

Os dados de pressão e velocidades médias demonstraram a necessidade de tratamento especial em todas as paredes do conduto a jusante da comporta e são orientadoras para a determinação da resistência dos materiais a serem aplicados na estrutura, devendo ainda ser observadas as pressões e velocidades instantâneas. As áreas com as menores pressões médias junto ao teto e com as maiores velocidades médias junto à base devem ser observadas com interesse pelos projetistas para a adoção de soluções que visem reduzir o potencial de cavitação e erosão.

4.5 PRESSÕES INSTANTÂNEAS JUNTO À BASE E AO TETO DO CONDUTO

Segundo Lopardo (1986), os fenômenos associados às pressões flutuantes macroturbulentas podem ser responsáveis por ações destrutivas sobre as estruturas por efeitos de arrancamento, fadiga, vibrações ou cavitação intermitente.

As medições de pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto a jusante da comporta segmento invertida, permitiram a análise das flutuações de pressão e a identificação dos valores extremos de pressão atingidos junto à estrutura.

Para os escoamentos com número de Reynolds superior a 300.000, o comportamento das flutuações de pressão ao longo da base e do teto do conduto foi descrito por um coeficiente adimensional da posição (L_{adm}) e por um coeficiente adimensional de pressão (CP).

O coeficiente de posição (L_{adm}), tal como para a pressão média, foi obtido pela relação entre a posição (L_i) dos pontos de medição, a partir do terminal da comporta, e a altura resultante do diferencial entre a altura do conduto (D) e a da abertura da comporta (a), conforme a Equação 4.20.

$$L_{adm} = \frac{L_i}{D - a}. \quad 4.20$$

4.5.1 FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO JUNTO À BASE E AO TETO DO CONDUTO

A partir dos dados experimentais, foi possível observar que as flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto foram influenciadas pela abertura da comporta e pela vazão, sendo que as maiores flutuações de pressão na base foram se afastando da comporta com o aumento da abertura da comporta. O inverso ocorreu no teto do conduto, no qual a posição do pico das flutuações de pressão ocorreu na região onde a expansão do jato atingiu o teto.

Para auxiliar na visualização, a Figura 4.137 apresenta as flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e

vazão de 32 l/s e a Figura 4.138 mostra as flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.

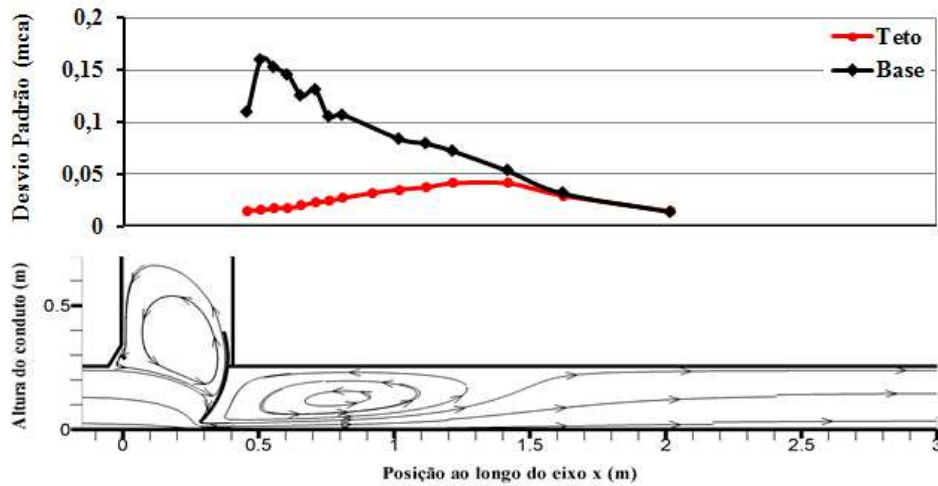


Figura 4.137 - Flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e vazão de 32 l/s.

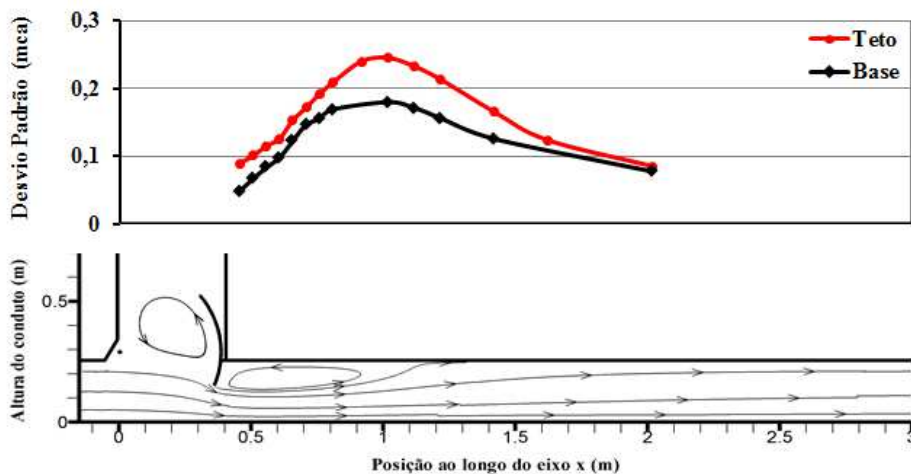


Figura 4.138 - Flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.

Para a representação das flutuações de pressão foi utilizado o coeficiente de flutuação de pressão ($C'P$), obtido a partir da relação apresentada na Equação 4.21.

$$C'P = \frac{SD}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}}, \quad 4.21$$

na qual:

- SD = flutuação de pressão (desvio padrão);
 V_a = velocidade média na seção da comporta;
 V_D = velocidade média no conduto; e
 g = aceleração devida à gravidade.

4.5.1.1 COEFICIENTE DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO JUNTO À BASE DO CONDUTO

Para a base do conduto, a relação entre o coeficiente de flutuação de pressão ($C'P$) e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foi mais bem representada, para cada grau de abertura da comporta, pela função racional apresentada na Equação 4.22. Os coeficientes Fb_i estão apresentados na Tabela 4.7, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$C'P = \frac{Fb_1 + Fb_2 L_{adm}}{1 + Fb_3 L_{adm} + Fb_4 L_{adm}^2}. \quad 4.22$$

Tabela 4.7 - Coeficientes para a Equação 4.22 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
Fb_1	-1.140.059.372	0,0593	0,0517	0,0491	0,0728	-14.495
Fb_2	3.858.330.429	0,0264	0,0223	0,0266	0,0414	271.697
Fb_3	6.014.201.367	-0,3090	-0,2053	-0,1186	0,1130	1.922.449
Fb_4	18.135.842.958	0,0804	0,0367	0,0283	0,0188	13.772
Desvio Padrão	0,0076	0,0120	0,0123	0,0136	0,0208	0,0201
Coeficiente de correlação (R^2)	0,97	0,95	0,96	0,92	0,67	0,41

As equações ajustadas para representar o comportamento das flutuações de pressões ao longo da base do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,92 para 10%, 30%, 50% e 60% de abertura da

comporta. Para 70% e 80% de abertura da comporta os coeficientes de correlação entre a curva ajustada e os dados foram de 0,67 e 0,41, respectivamente. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 70% de abertura da comporta.

Da Figura 4.139 até a Figura 4.144 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.145 mostra em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas.

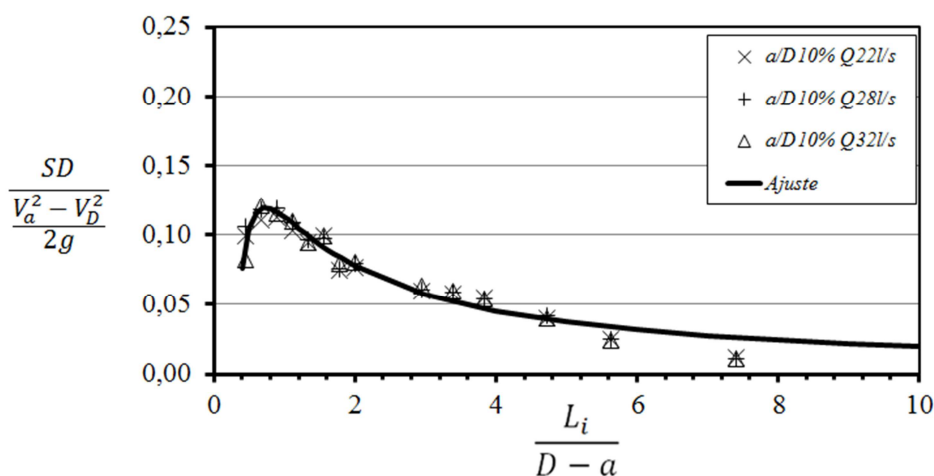


Figura 4.139 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.

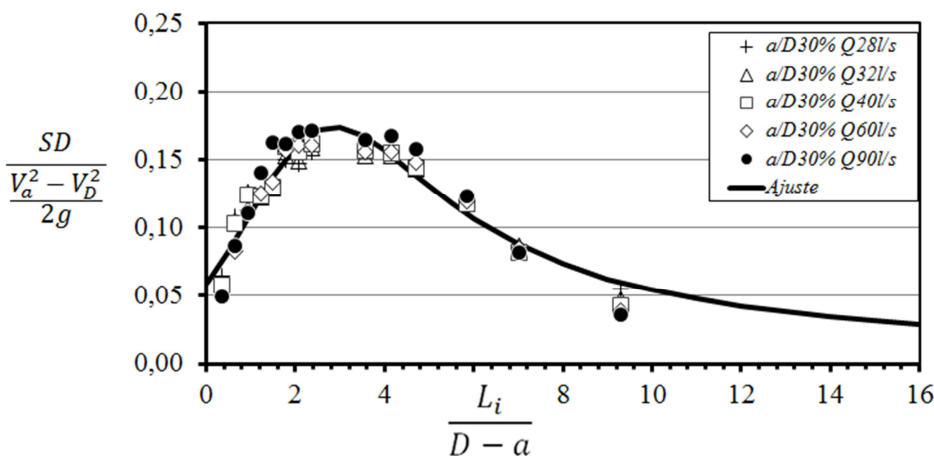


Figura 4.140 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.

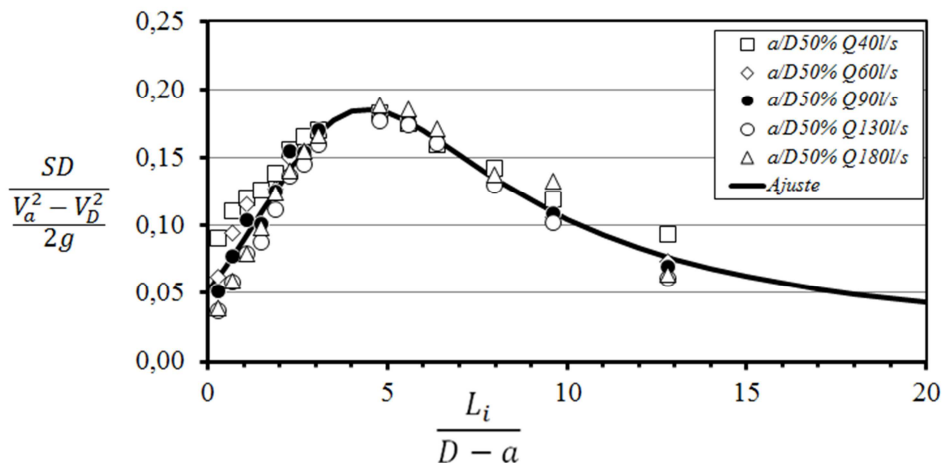


Figura 4.141 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.

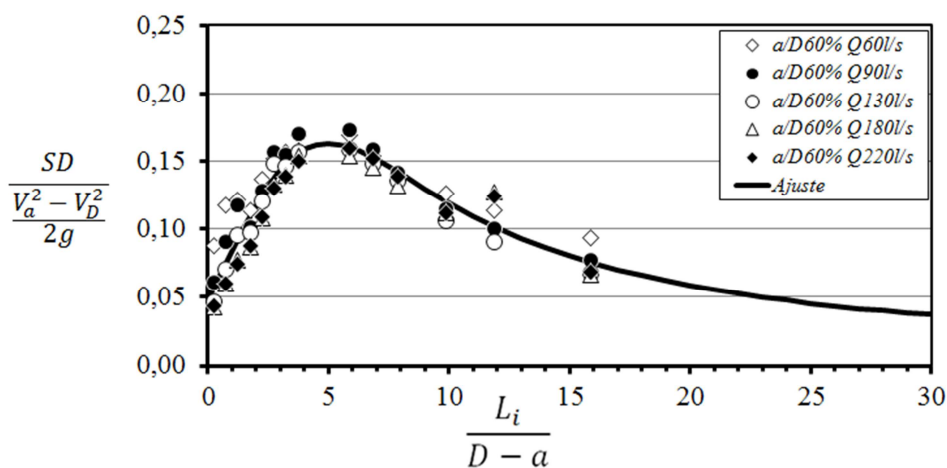


Figura 4.142 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.

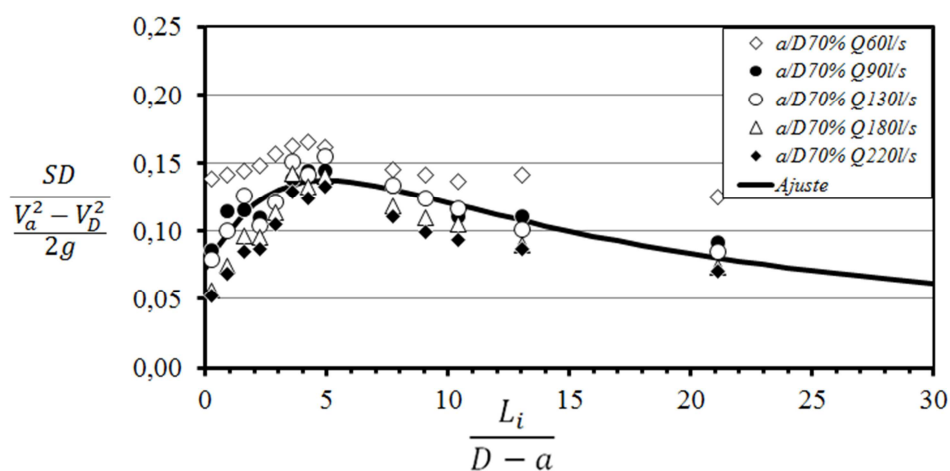


Figura 4.143 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.

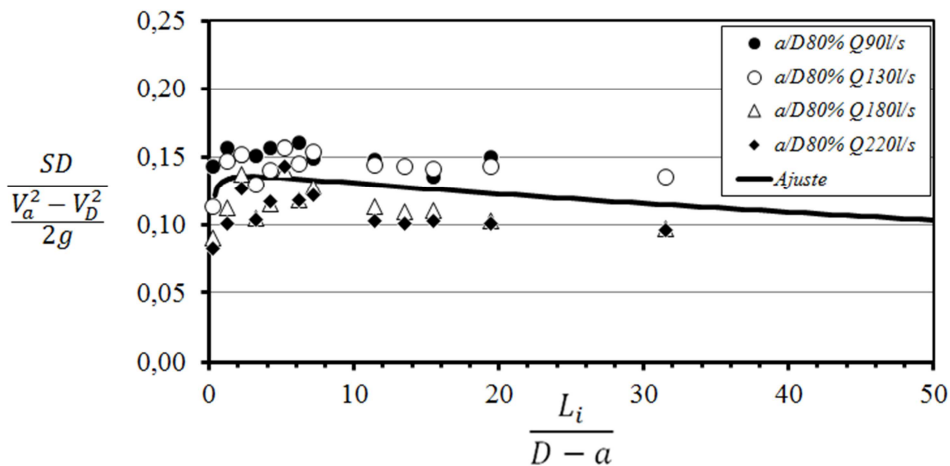


Figura 4.144 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.

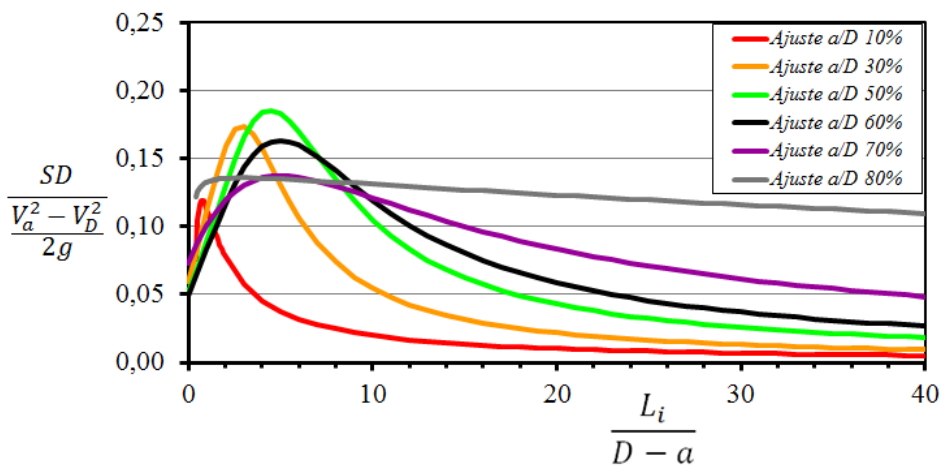


Figura 4.145 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto.

Os dados demonstram que os coeficientes de flutuação de pressão para a base do conduto aumentaram de valor com o aumento da distância da comporta e atingiram um limite para então diminuir com o aumento da distância. Para 50% de abertura da comporta foi atingido o maior valor para o coeficiente de flutuação da pressão. Para a maior abertura da comporta testada, 80%, os valores do coeficiente de flutuação da pressão na base do conduto apresentaram uma tendência de redução constante com o aumento da distância da comporta.

4.5.1.2 COEFICIENTE DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO JUNTO AO TETO DO CONDUTO

Para o teto do conduto, a relação entre o coeficiente de flutuação de pressão ($C'P$) e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foi mais bem representada, para cada grau de abertura da comporta, pela função racional apresentada na Equação 4.23. Os coeficientes Ft_i estão apresentados na Tabela 4.8, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$C'P = \frac{Ft_1 + Ft_2 L_{adm}}{1 + Ft_3 L_{adm} + Ft_4 L_{adm}^2} \quad 4.23$$

As equações ajustadas para representar o comportamento das flutuações de pressões ao longo do teto do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,87. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 70% de abertura da comporta.

Tabela 4.8 - Coeficientes para a Equação 4.23 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
Ft_1	0,0106	0,0393	0,0683	0,0753	0,1109	-0,4088
Ft_2	-0,0004	0,0003	0,0062	0,0108	0,0258	0,5622
Ft_3	-0,3339	-0,2455	-0,1804	-0,1709	-0,0923	0,6242
Ft_4	0,0379	0,0241	0,0192	0,0196	0,0177	0,1319
Desvio Padrão	0,0014	0,0111	0,0185	0,0104	0,0250	0,0226
Coeficiente de correlação (R^2)	0,98	0,90	0,87	0,97	0,88	0,95

Da Figura 4.146 até a Figura 4.151 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.152 mostra em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas.

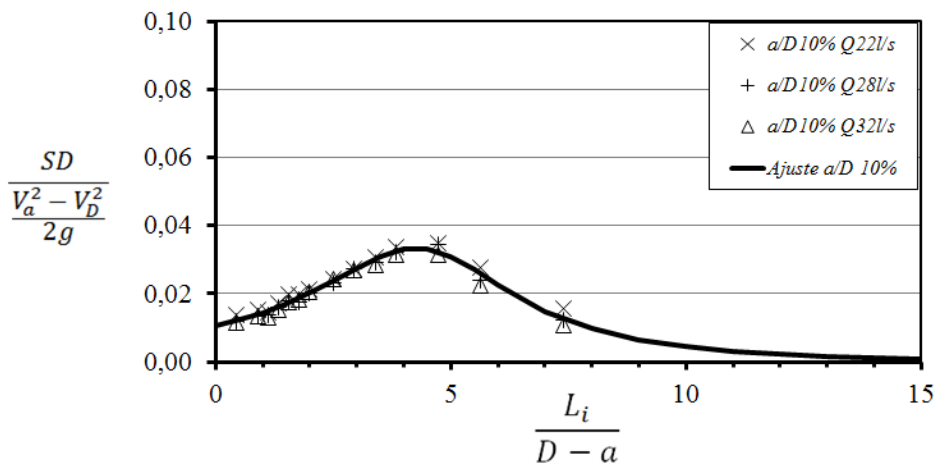


Figura 4.146 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.

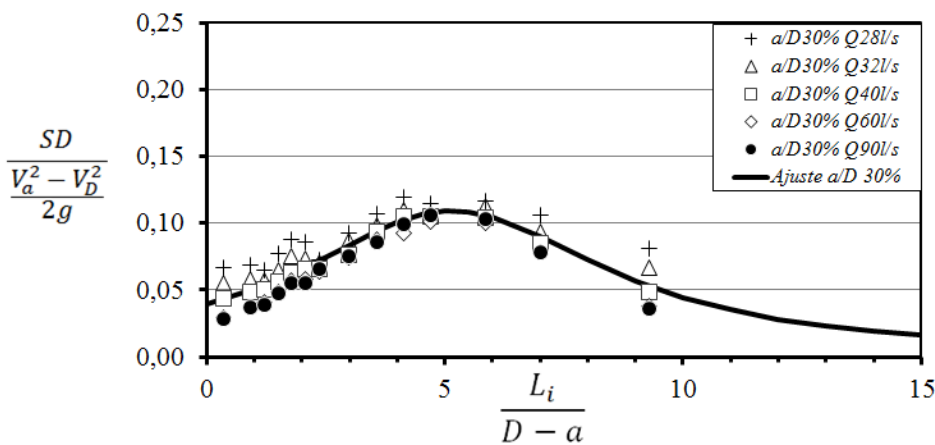


Figura 4.147 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.

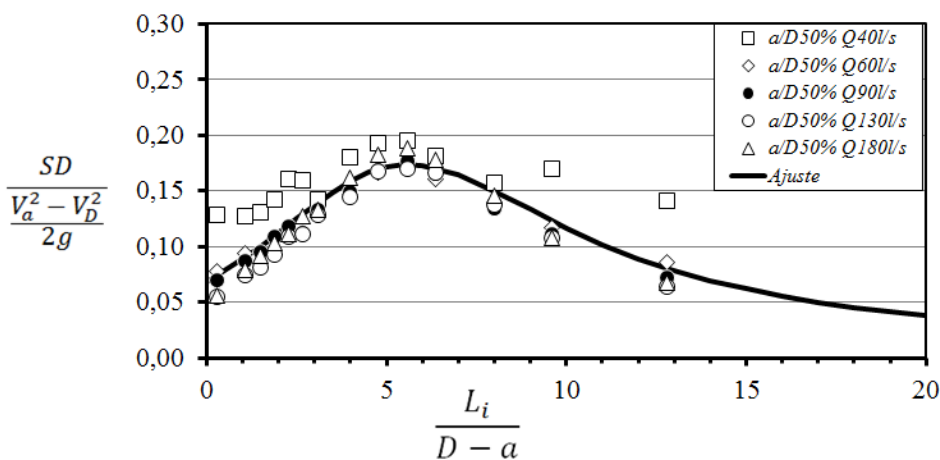


Figura 4.148 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.

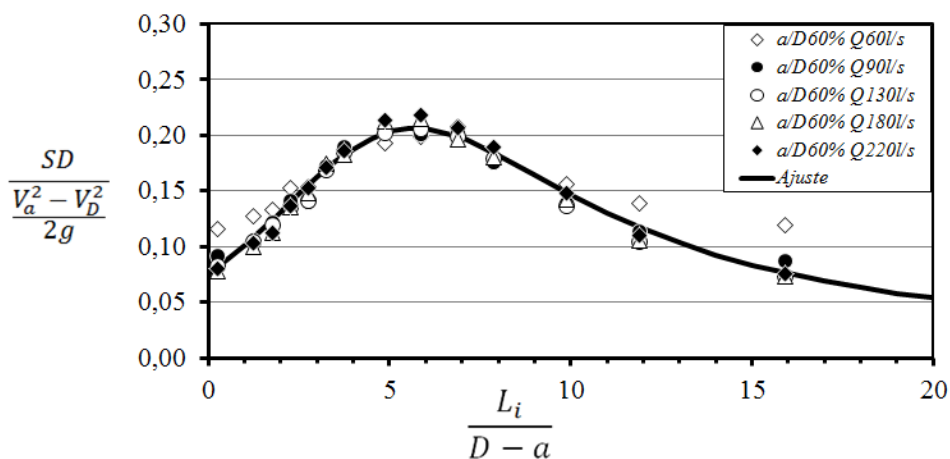


Figura 4.149 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.

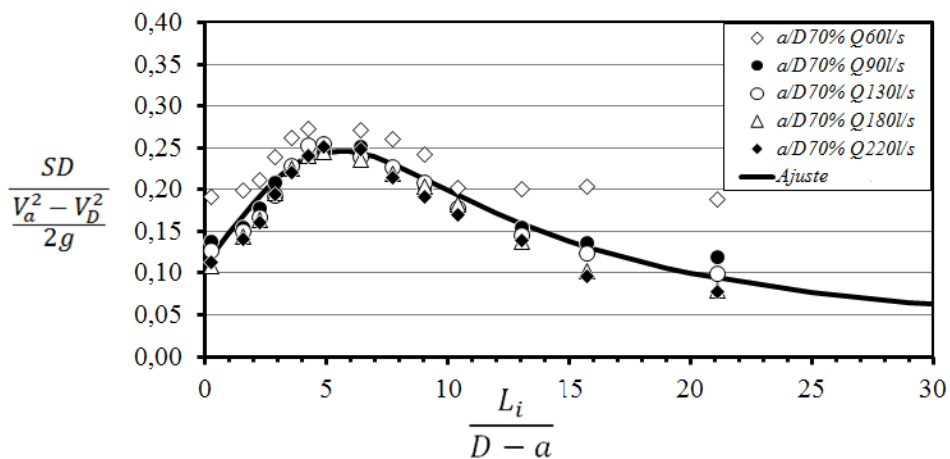


Figura 4.150 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.

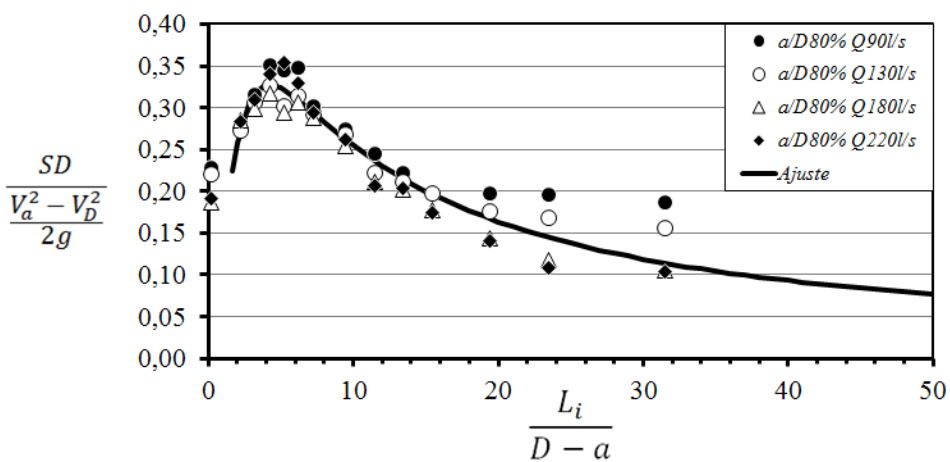


Figura 4.151 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.

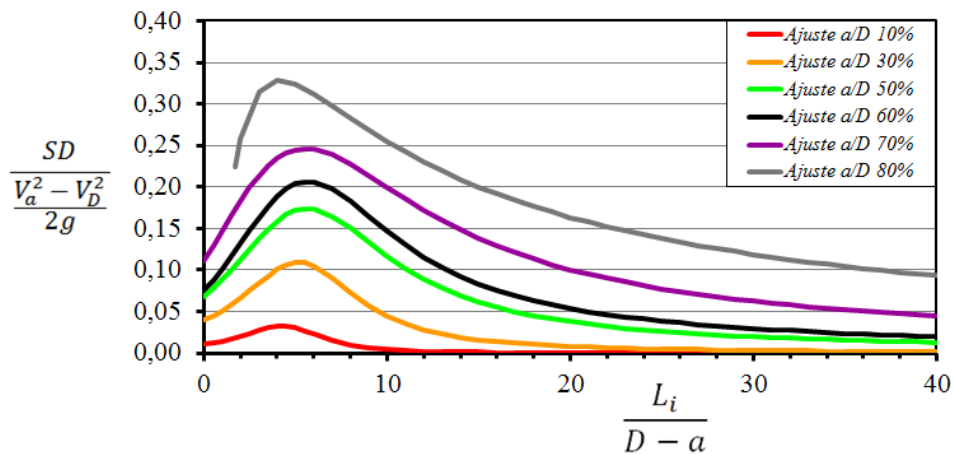


Figura 4.152 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto.

Os valores do coeficiente de flutuação de pressão tenderam a aumentar com o aumento da distância da comporta até um limite a partir do qual começam a diminuir. Conforme aumentou o grau de abertura da comporta, aumentaram os valores do coeficiente de flutuação de pressão no teto do conduto.

4.5.2 PRESSÕES MÍNIMAS JUNTO À BASE E AO TETO DO CONDUTO

Para a representação das pressões mínimas, foram escolhidos coeficientes de pressão denominados $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$, calculados para as pressões com probabilidade de serem igualadas ou superadas em 99,9% e 99% das ocorrências, respectivamente. Os valores de $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$ foram obtidos a partir das relações apresentadas, respectivamente, na Equação 4.24 e na Equação 4.25.

$$CP_{0,1\%} = \frac{P_{0,1\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}}, \quad 4.24$$

$$CP_{1\%} = \frac{P_{1\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}}, \quad 4.25$$

nas quais:

$P_{0,1\%}$	=	pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99,9% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta;
$P_{1\%}$	=	pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta;
\bar{P}	=	pressão média no ponto de medição igualada para determinado grau de abertura da comporta;
V_a	=	velocidade média na seção da comporta;
V_D	=	velocidade média no conduto; e
g	=	aceleração devida à gravidade.

Os coeficientes de pressão foram calculados para os escoamentos com número de Reynolds superior a 300.000.

4.5.2.1 COEFICIENTES DE PRESSÃO MÍNIMA JUNTO À BASE DO CONDUTO

Para a base do conduto, as relações entre os coeficientes $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$, e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foram mais bem representadas, para cada grau de abertura da comporta, pelas funções racionais apresentadas nas Equações 4.26 e 4.27, respectivamente. Os coeficientes ab_i e bb_i estão apresentados, respectivamente, na Tabela 4.9 e na Tabela 4.10, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$CP_{0,1\%} = \frac{ab_1 + ab_2 L_{adm}}{1 + ab_3 L_{adm} + ab_4 L_{adm}^2}. \quad 4.26$$

$$CP_{1\%} = \frac{bb_1 + bb_2 L_{adm}}{1 + bb_3 L_{adm} + bb_4 L_{adm}^2}. \quad 4.27$$

Até 60% de abertura da comporta, as equações ajustadas para representar o comportamento das pressões mínimas ao longo da base do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,91. Para 70% e 80% de abertura da comporta os coeficientes de correlação entre a curva ajustada e os dados variaram entre 0,64 e 0,36. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 70% de abertura da comporta.

Tabela 4.9 - Coeficientes para a Equação 4.26 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto.

Coeficiente	<i>a/D</i> 10%	<i>a/D</i> 30%	<i>a/D</i> 50%	<i>a/D</i> 60%	<i>a/D</i> 70%	<i>a/D</i> 80%
<i>ab</i>₁	2.708.726	-0,1450	-0,1640	-0,1654	-0,2357	-0,2208
<i>ab</i>₂	-8.621.411	-0,1291	-0,0606	-0,0597	-0,1295	-1,7759
<i>ab</i>₃	4.211.615	-0,2972	-0,1703	-0,1014	0,1589	3,9533
<i>ab</i>₄	11.418.220	0,0886	0,0260	0,0179	0,0119	0,0229
Desvio Padrão	0,025	0,038	0,053	0,048	0,084	0,072
Coeficiente de correlação (R²)	0,97	0,96	0,93	0,91	0,52	0,36

Tabela 4.10 - Coeficientes para a Equação 4.27 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{1\%}$ para a base do conduto.

Coeficiente	<i>a/D</i> 10%	<i>a/D</i> 30%	<i>a/D</i> 50%	<i>a/D</i> 60%	<i>a/D</i> 70%	<i>a/D</i> 80%
<i>bb</i>₁	206.162	-0,1148	-0,1190	-0,1202	-0,1742	144,6
<i>bb</i>₂	-699.277	-0,0798	-0,0427	-0,0449	-0,0799	-2904,8
<i>bb</i>₃	530.800	-0,2932	-0,1926	-0,1247	0,0944	8914,5
<i>bb</i>₄	1.381.560	0,0851	0,0306	0,0226	0,0146	52,2
Desvio Padrão	0,017	0,026	0,032	0,033	0,049	0,049
Coeficiente de correlação (R²)	0,98	0,96	0,94	0,91	0,64	0,36

Da Figura 4.153 até a Figura 4.164 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e de pressão mínima para a base do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.165 e a Figura 4.166 mostram em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas para $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$.

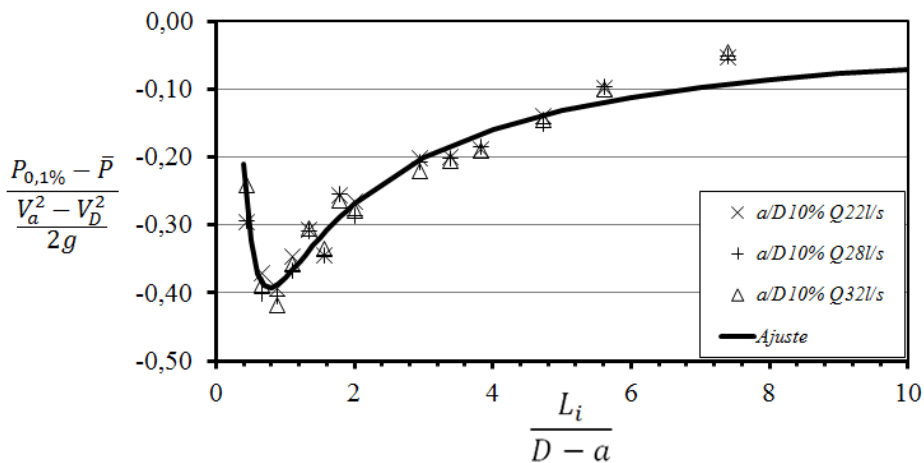


Figura 4.153 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.

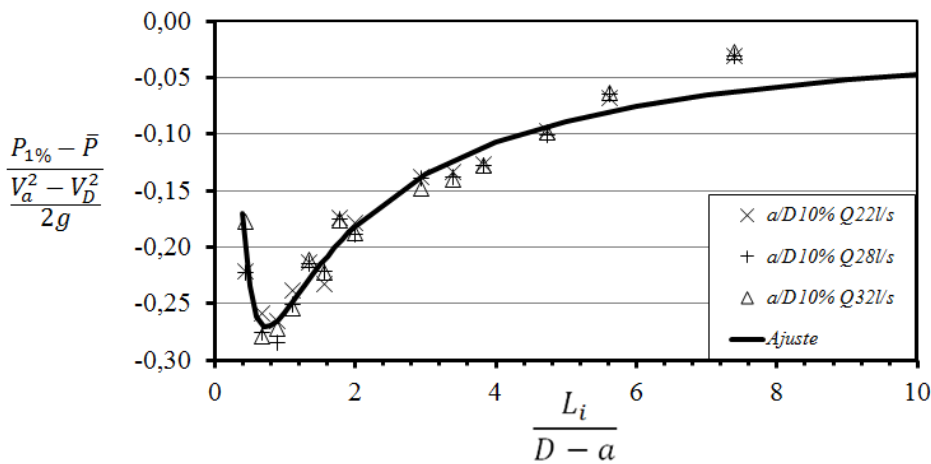


Figura 4.154 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.

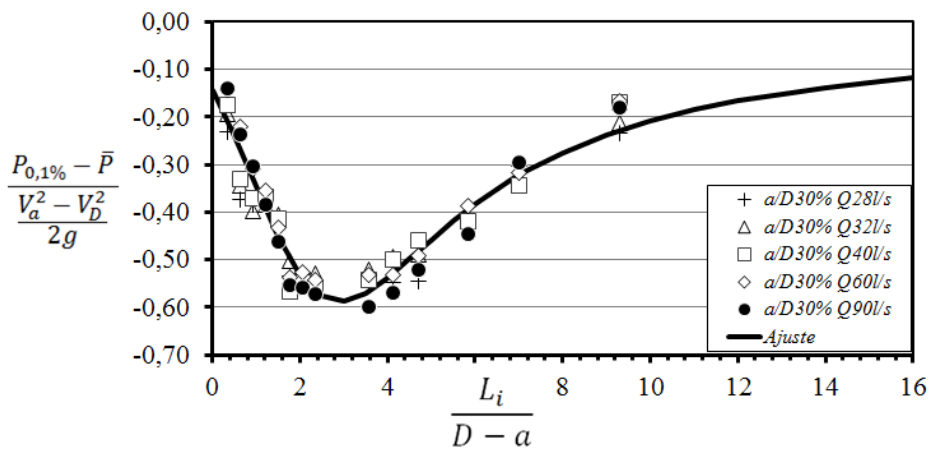


Figura 4.155 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.

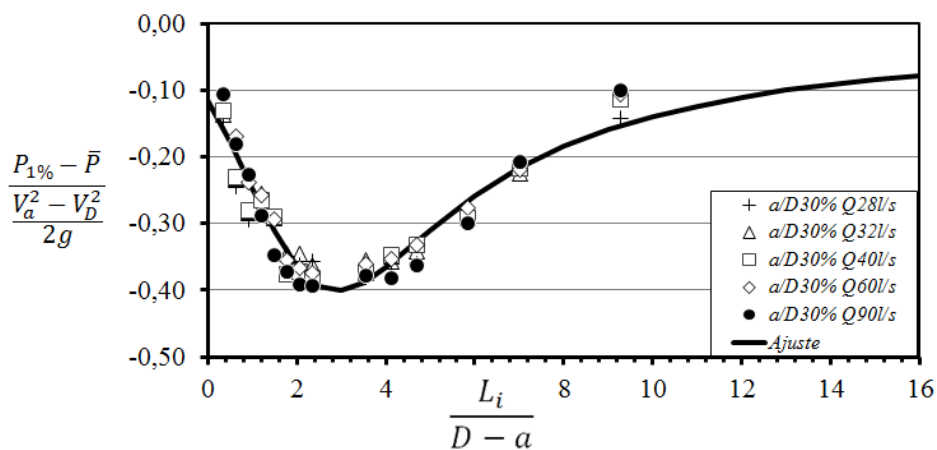


Figura 4.156 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.

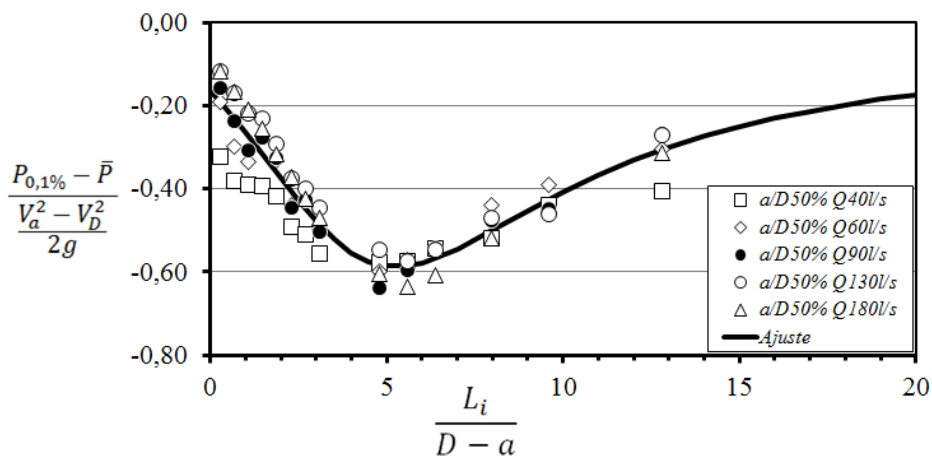


Figura 4.157 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.

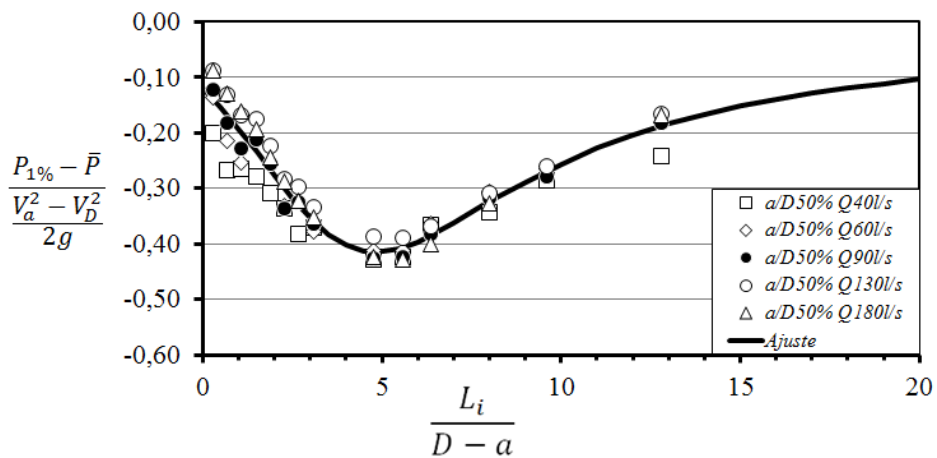


Figura 4.158 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.

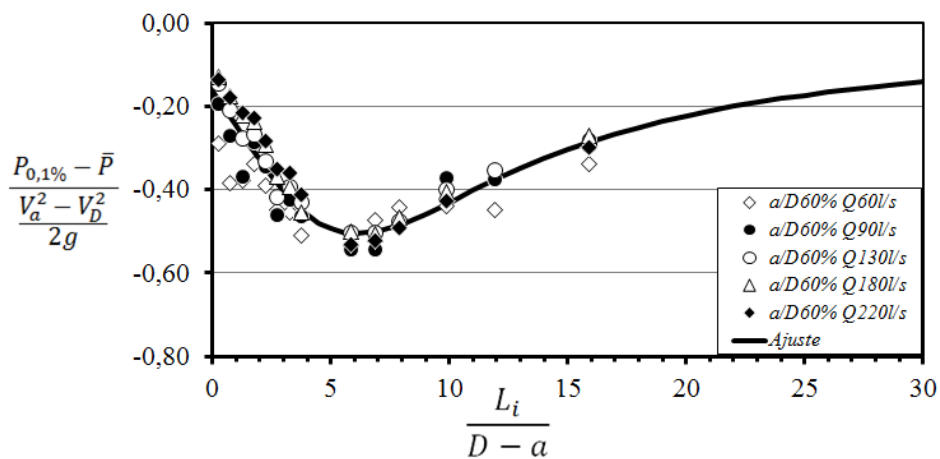


Figura 4.159 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.

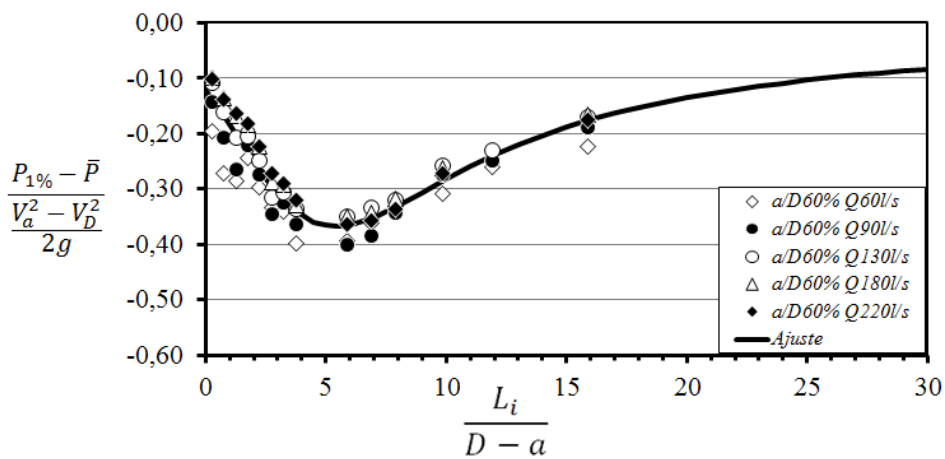


Figura 4.160 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.

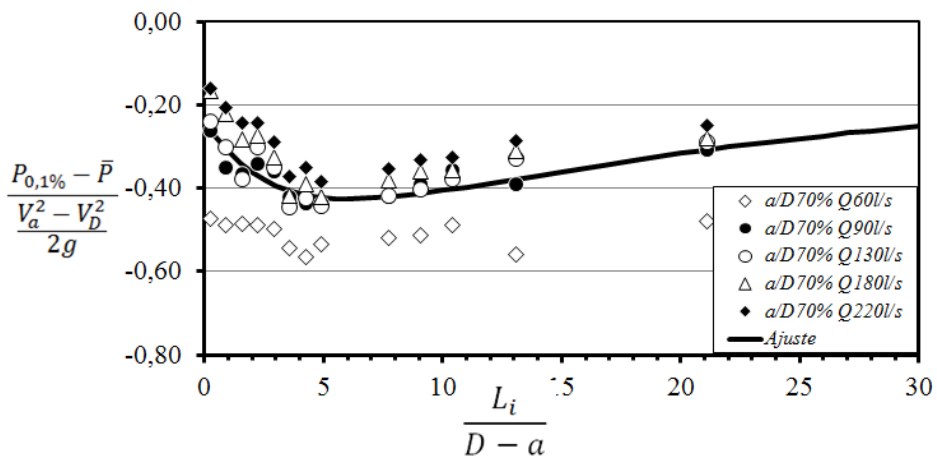


Figura 4.161 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.

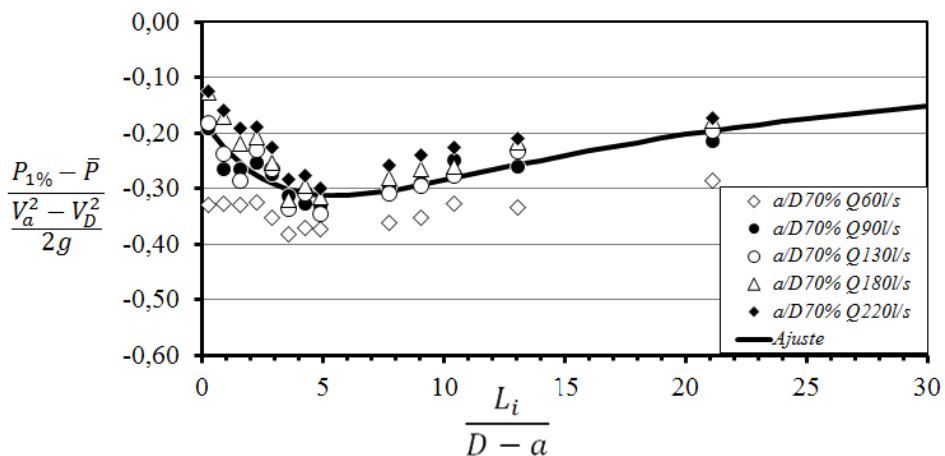


Figura 4.162 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.

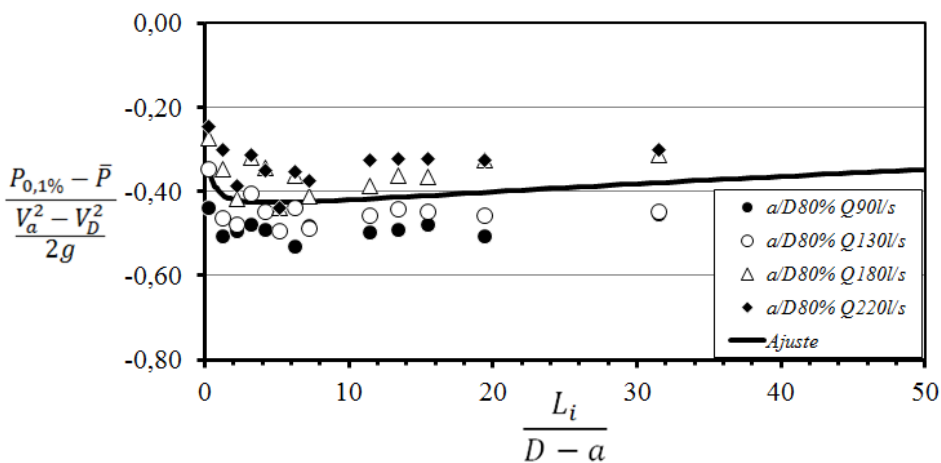


Figura 4.163 - $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.

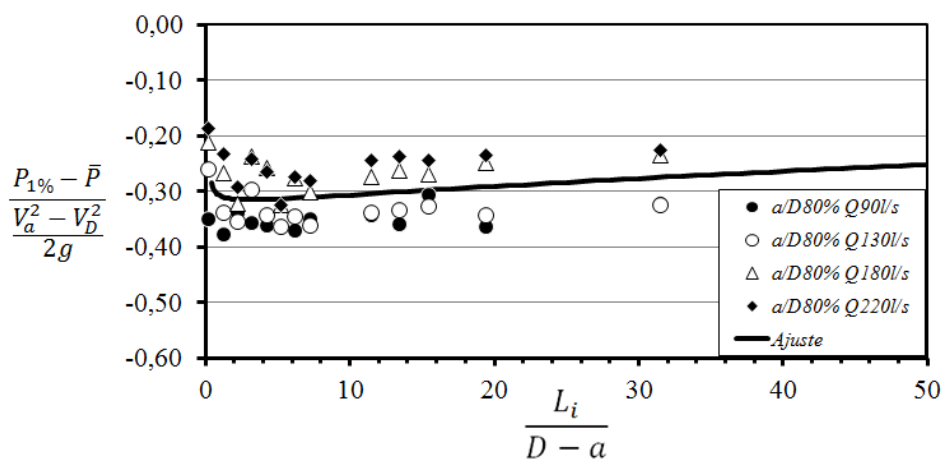


Figura 4.164 - $CP_{1\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.

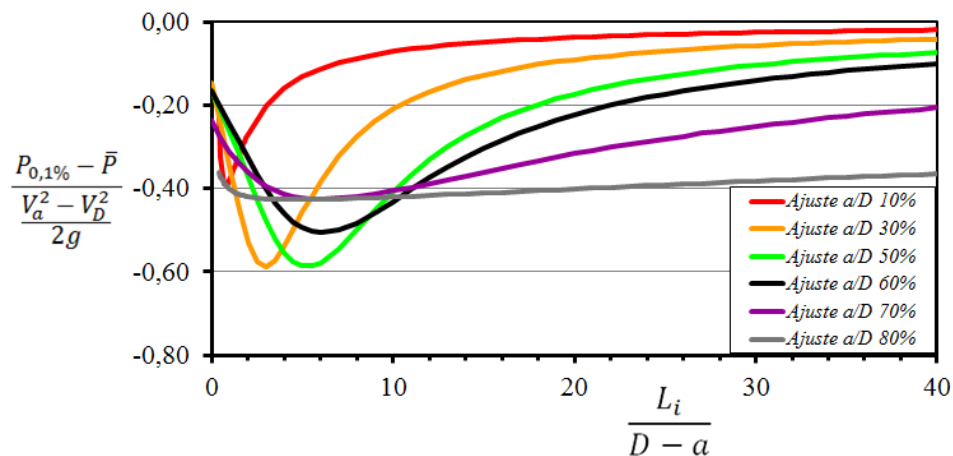


Figura 4.165 - Ajustes de $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto.

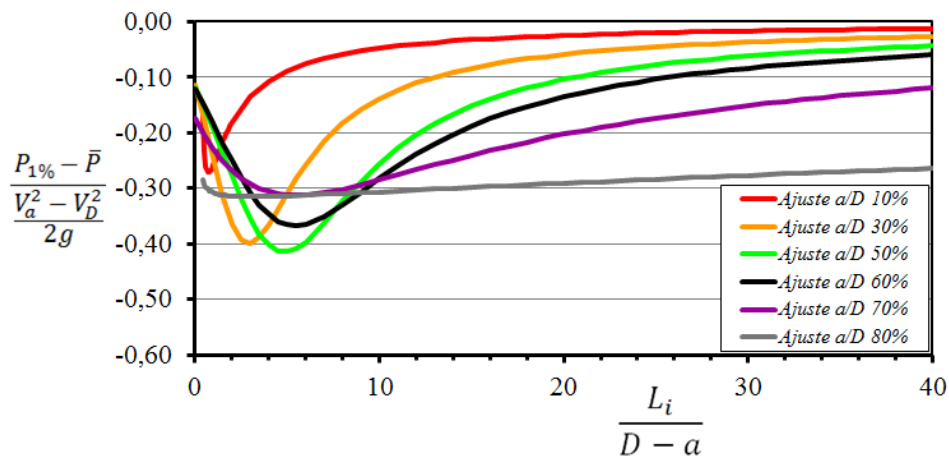


Figura 4.166 - Ajustes de $CP_{1\%}$ para a base do conduto.

Os coeficientes de pressão mínima na base do conduto tenderam a apresentar valores que diminuem conforme aumenta a distância da comporta até determinado ponto a partir do qual os valores dos coeficientes passam a aumentar. A curva formada foi suavizada com o aumento do grau de abertura da comporta. Os menores valores de $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$ para a base do conduto foram atingidos para 30% e 50% de abertura da comporta.

4.5.2.2 COEFICIENTES DE PRESSÃO MÍNIMA JUNTO AO TETO DO CONDUTO

Para o teto do conduto, as relações entre os coeficientes $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$, e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foram mais bem representadas, para cada grau

de abertura da comporta, pelas funções racionais apresentadas nas Equações 4.28 e 4.29, respectivamente. Os coeficientes at_i e bt_i estão apresentados, respectivamente, na Tabela 4.11 e na Tabela 4.12, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$CP_{0,1\%} = \frac{at_1 + at_2 L_{adm}}{1 + at_3 L_{adm} + at_4 L_{adm}^2} \quad 4.28$$

$$CP_{1\%} = \frac{bt_1 + bt_2 L_{adm}}{1 + bt_3 L_{adm} + bt_4 L_{adm}^2} \quad 4.29$$

Nas equações ajustadas para as condições com 50% e 70% de abertura da comporta foram desconsiderados os dados das vazões de 40 l/s e 60 l/s, respectivamente.

Tabela 4.11 - Coeficientes para a Equação 4.28 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
at_1	-0,0288	-0,1445	-0,2914	-0,3793	-0,4537	-0,7505
at_2	-0,0147	-0,0637	-0,0447	-0,0354	-0,0663	-0,2485
at_3	-0,3436	-0,1315	-0,1323	-0,1083	-0,0719	0,0852
at_4	0,0740	0,0363	0,0228	0,0149	0,0142	0,0162
Desvio Padrão	0,010	0,053	0,047	0,049	0,036	0,084
Coeficiente de correlação (R²)	0,93	0,77	0,90	0,91	0,97	0,92

Tabela 4.12 - Coeficientes para a Equação 4.29 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{1\%}$ para o teto do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
bt_1	-0,0275	-0,1104	-0,1726	-0,2102	-0,2650	-0,4867
bt_2	-0,0002	-0,0006	-0,0074	-0,0190	-0,0452	-0,1931
bt_3	-0,3183	-0,2272	-0,1800	-0,1567	-0,1036	0,1102
bt_4	0,0399	0,0227	0,0174	0,0170	0,0161	0,0186
Desvio Padrão	0,005	0,029	0,020	0,023	0,026	0,049
Coeficiente de correlação (R²)	0,96	0,86	0,97	0,97	0,97	0,94

As equações ajustadas para representar o comportamento das pressões mínimas ao longo do teto do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,77. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 80% de abertura da comporta.

Da Figura 4.167 até a Figura 4.178 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.179 e a Figura 4.180 mostram em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas para $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$.

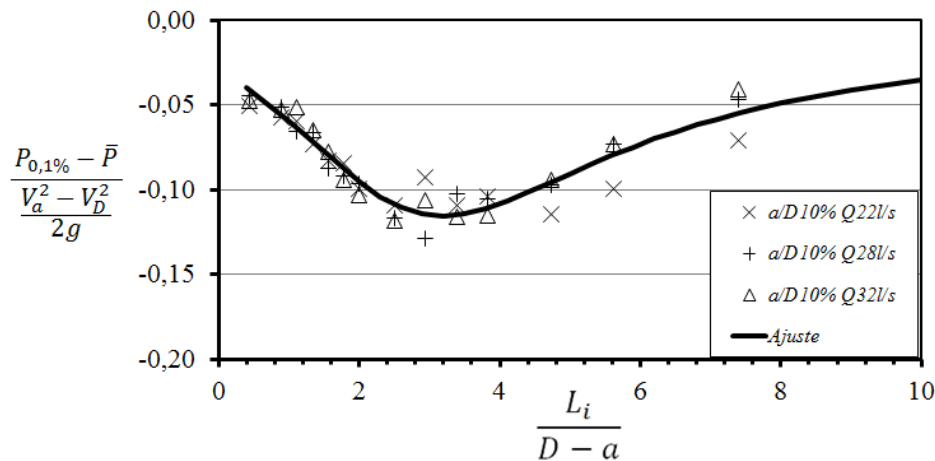


Figura 4.167 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.

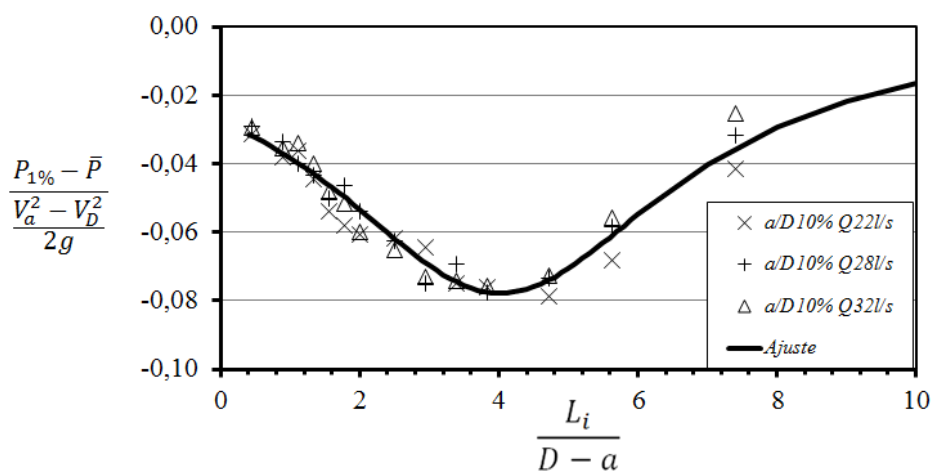


Figura 4.168 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.

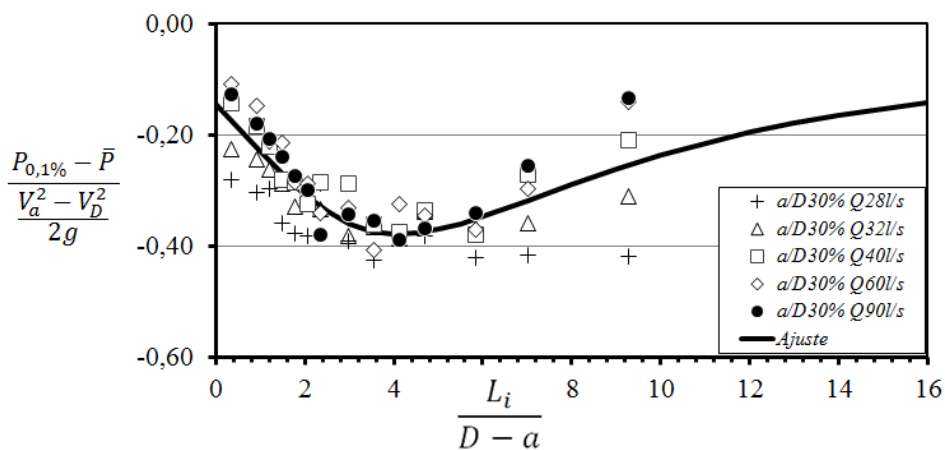


Figura 4.169 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.

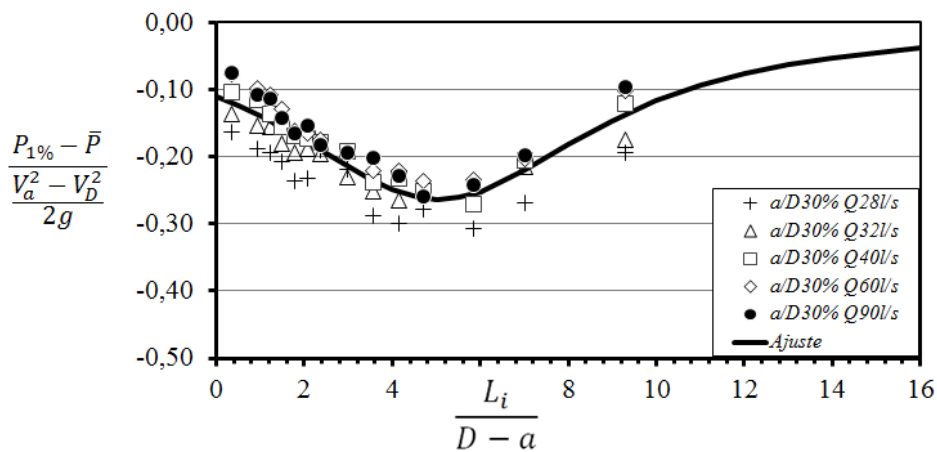


Figura 4.170 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.

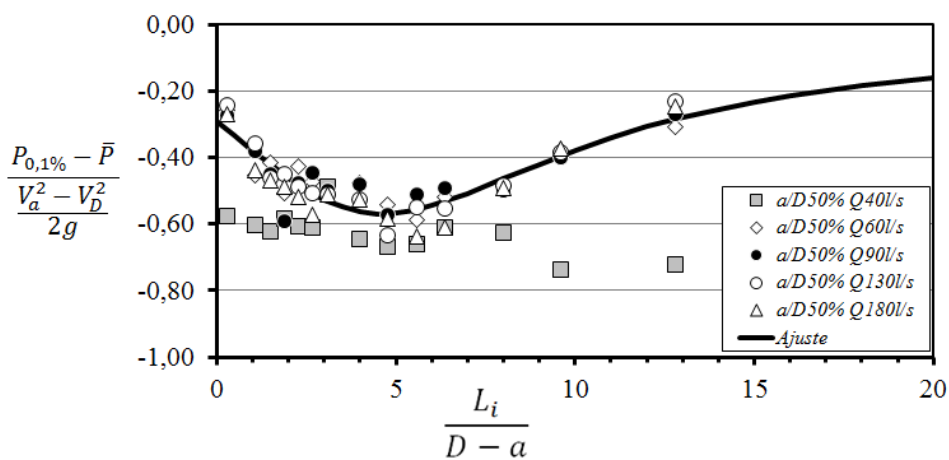


Figura 4.171 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.

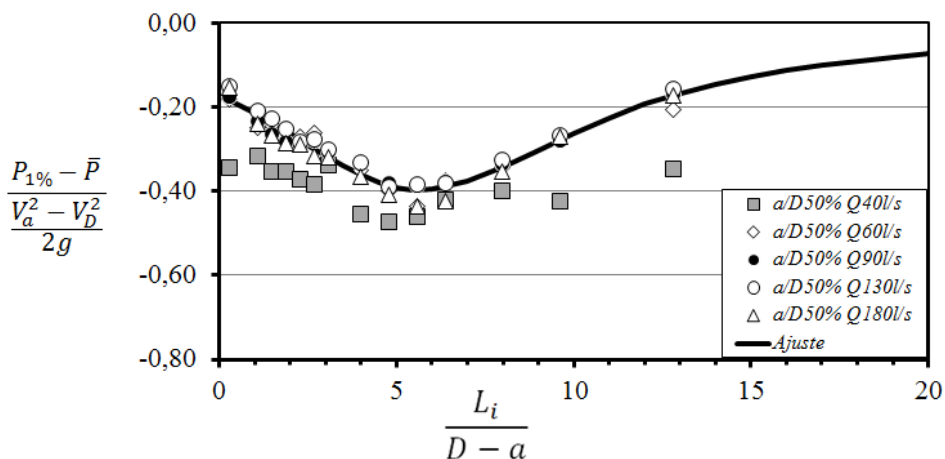


Figura 4.172 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.

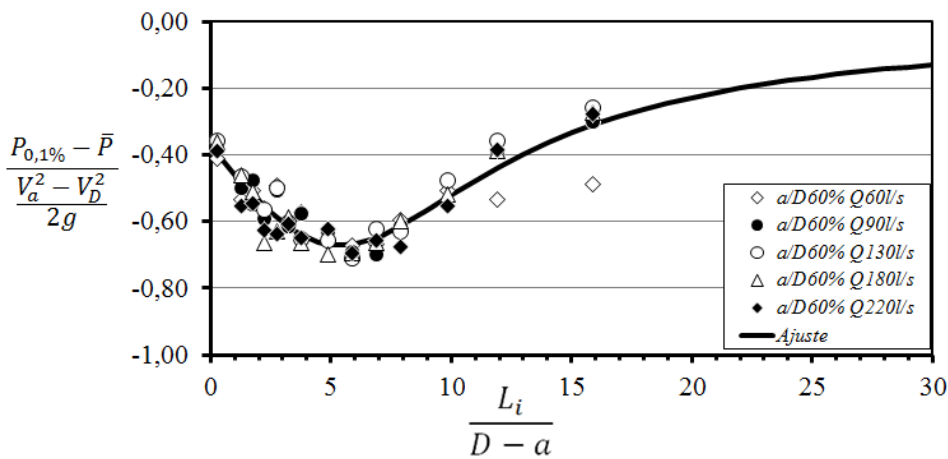


Figura 4.173 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.

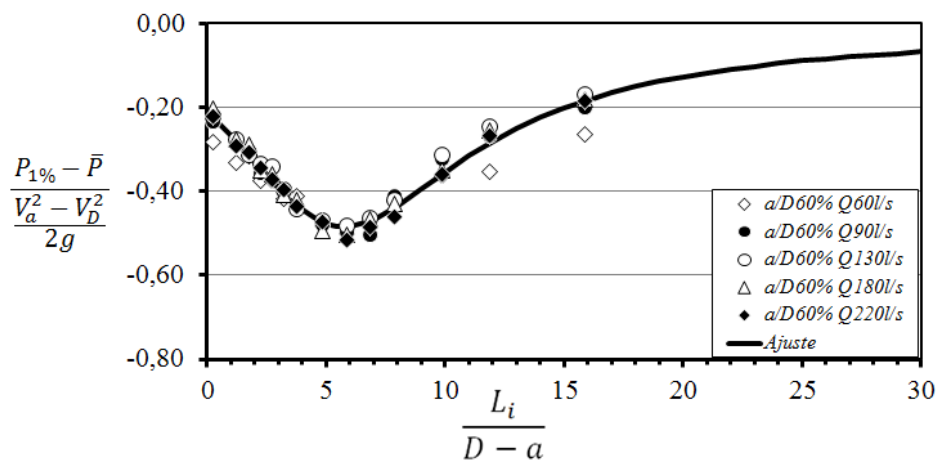


Figura 4.174 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.

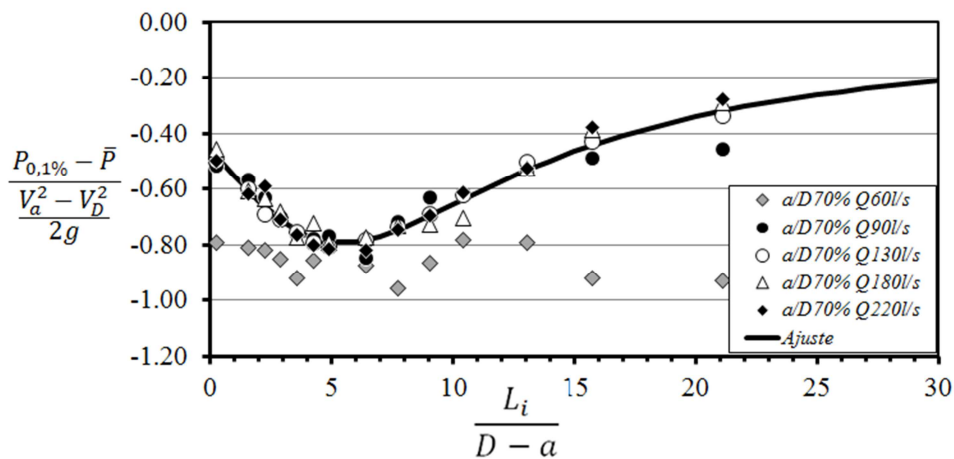


Figura 4.175 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.

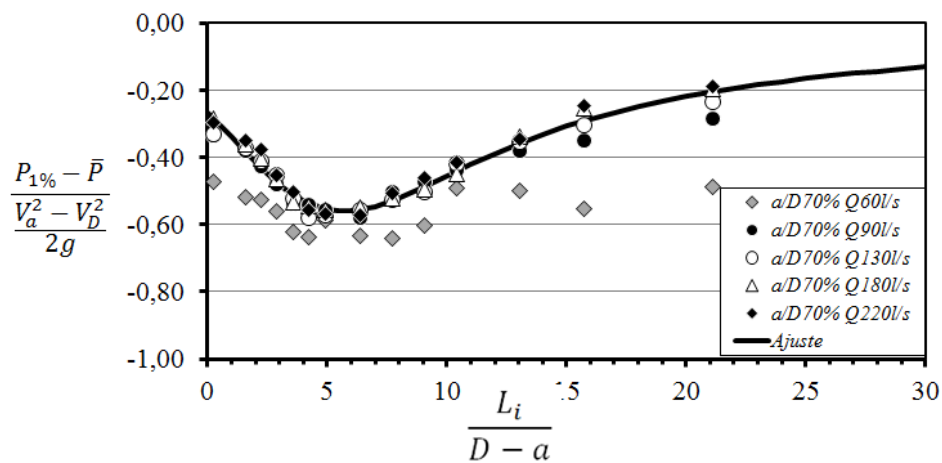


Figura 4.176 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.

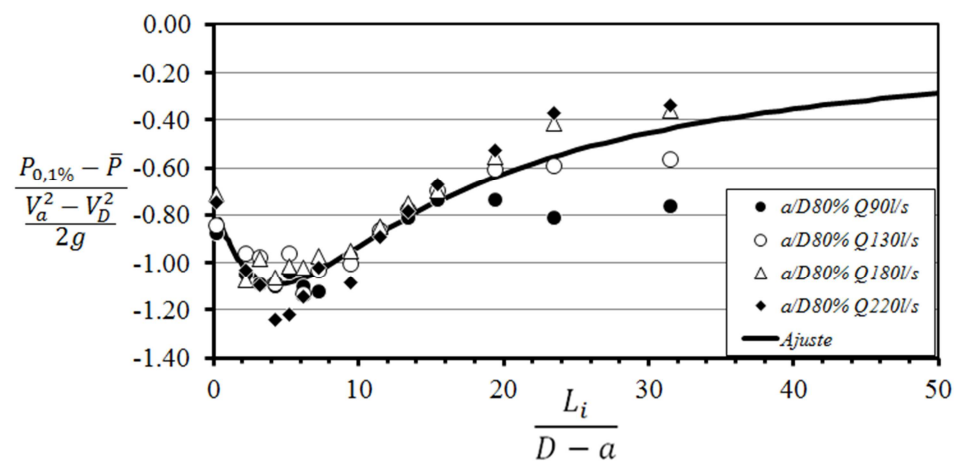


Figura 4.177 - $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.

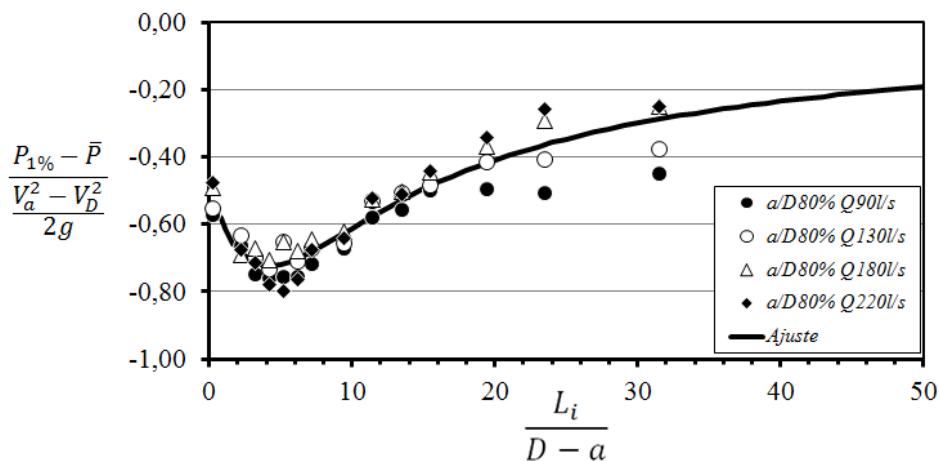


Figura 4.178 - $CP_{1\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.

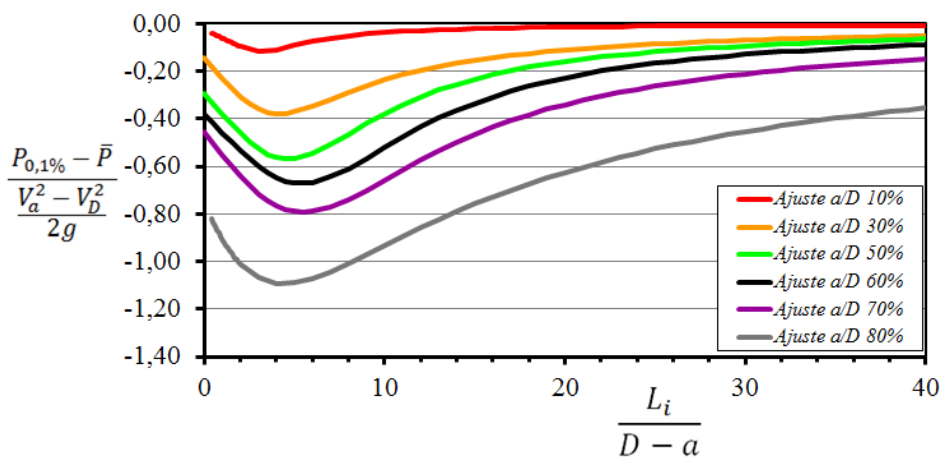


Figura 4.179 - Ajustes de $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto.

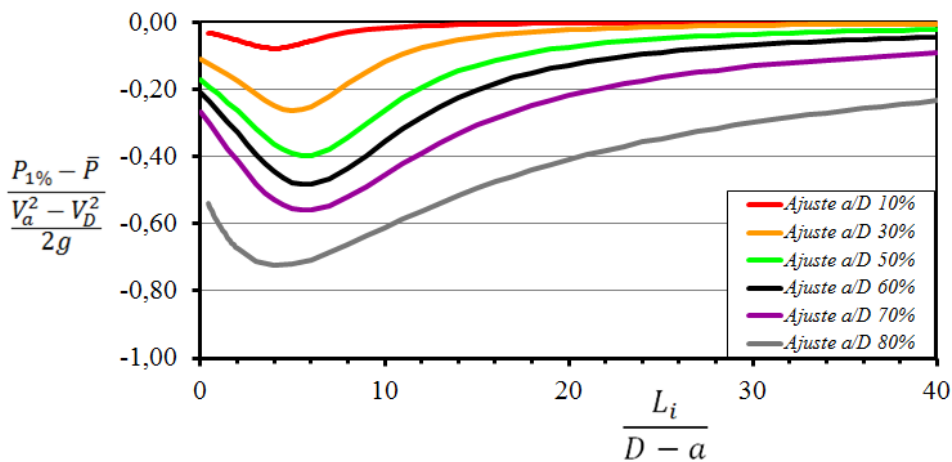


Figura 4.180 - Ajustes de $CP_{1\%}$ para o teto do conduto.

Os coeficientes de pressão mínima no teto do conduto tenderam a apresentar valores que diminuem com o aumento da distância da comporta até determinado ponto a partir do qual os valores dos coeficientes passam a aumentar. Conforme aumentou o grau de abertura da comporta, diminuíram os valores de $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$ para o teto do conduto.

4.5.3 PRESSÕES MÁXIMAS JUNTO À BASE E AO TETO DO CONDUTO

Para a representação das pressões máximas, foram escolhidos coeficientes de pressão denominados $CP_{99,9\%}$ e $CP_{99\%}$, calculados para as pressões com probabilidade de serem igualadas ou superadas em 0,1% e 1% das ocorrências, respectivamente. Os valores de $CP_{99,9\%}$ e $CP_{99\%}$ foram obtidos a partir das relações apresentadas na Equação 4.30 e na Equação 4.31.

$$CP_{99,9\%} = \frac{P_{99,9\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}}, \quad 4.30$$

$$CP_{99\%} = \frac{P_{99\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}}, \quad 4.31$$

nas quais:

- $P_{99,9\%}$ = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 0,1% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta;
- $P_{99\%}$ = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 1% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta;
- \bar{P} = pressão média no ponto de medição igualada para determinado grau de abertura da comporta;
- V_a = velocidade média na seção da comporta;
- V_D = velocidade média no conduto; e
- g = aceleração devida à gravidade.

4.5.3.1 COEFICIENTES DE PRESSÃO MÁXIMA JUNTO À BASE DO CONDUTO

Para a base do conduto, as relações entre os coeficientes $CP_{99,9\%}$ e $CP_{99\%}$, e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foram mais bem representadas, para cada grau de abertura da comporta, pelas funções apresentadas nas Equações 4.32 e 4.33, respectivamente. Os coeficientes cb_i e db_i estão apresentados, respectivamente, na Tabela 4.13 e na Tabela 4.14, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$CP_{99,9\%} = cb_1 \times cb_2^{L_{adm}} \times L_{adm}^{cb_3}. \quad 4.32$$

$$CP_{99\%} = db_1 \times db_2^{L_{adm}} \times L_{adm}^{db_3}. \quad 4.33$$

As equações ajustadas para representar o comportamento das pressões máximas ao longo da base do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,93 para 10%, 30%, 50% e 60% de abertura da comporta. Para 70% e 80% de abertura da comporta os coeficientes de correlação entre a curva ajustada e os dados variaram entre 0,65 e 0,36. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 70% de abertura da comporta.

Da Figura 4.181 até a Figura 4.192 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.193 e a Figura 4.194 mostram em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas para $CP_{99,9\%}$ e $CP_{99\%}$.

Tabela 4.13 - Coeficientes para a Equação 4.32 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
cb_1	0,8042	0,7104	0,4427	0,3780	0,3846	0,4094
cb_2	0,5842	0,6558	0,7869	0,8410	0,9397	0,9857
cb_3	0,4421	1,1108	1,0004	0,8084	0,3013	0,0829
Desvio Padrão	0,031	0,055	0,060	0,050	0,085	0,074
Coeficiente de correlação (R²)	0,98	0,95	0,94	0,94	0,62	0,36

Tabela 4.14 - Coeficientes para a Equação 4.33 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99\%}$ para a base do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
db_1	0,4549	0,4514	0,3110	0,2674	0,2767	0,2994
db_2	0,6272	0,6880	0,7911	0,8501	0,9403	0,9851
db_3	0,3478	0,9780	0,9471	0,7431	0,2948	0,0892
Desvio Padrão	0,018	0,029	0,033	0,036	0,055	0,048
Coeficiente de correlação (R^2)	0,98	0,96	0,96	0,93	0,65	0,42

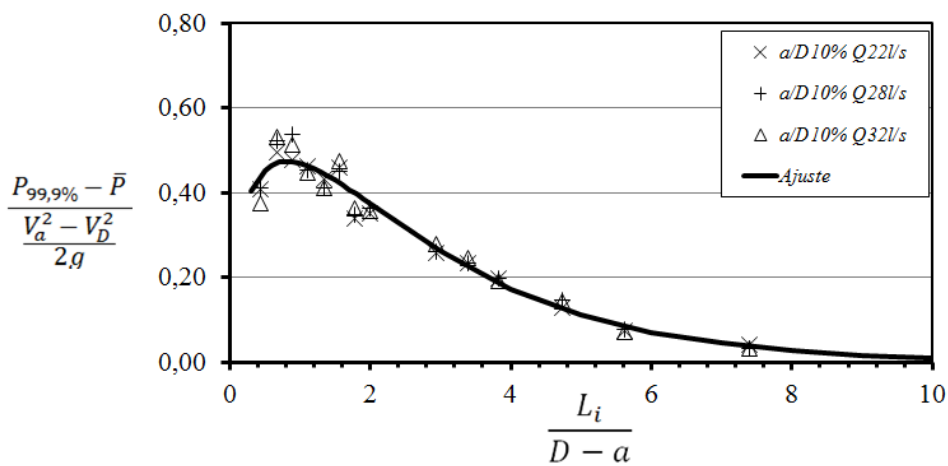


Figura 4.181 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.

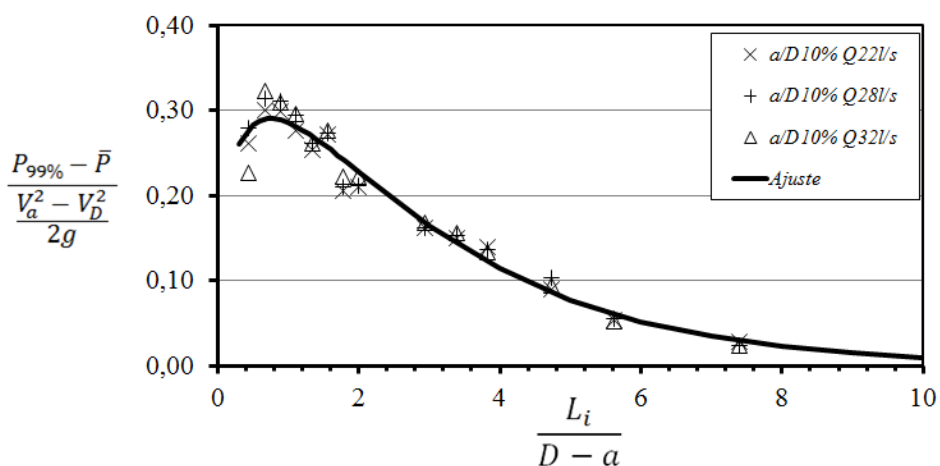


Figura 4.182 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.

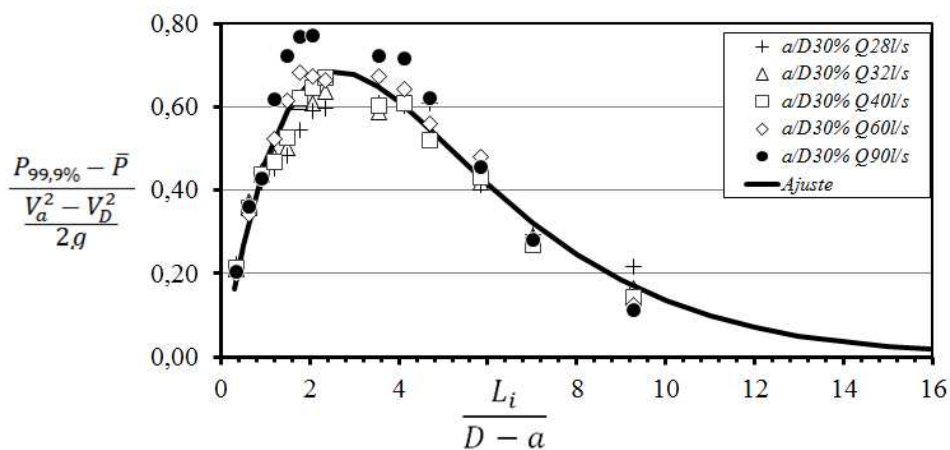


Figura 4.183 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.

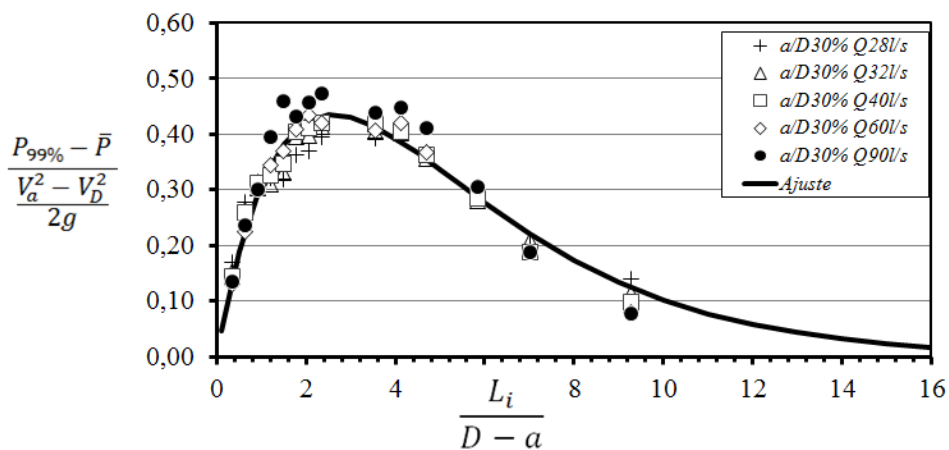


Figura 4.184 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.

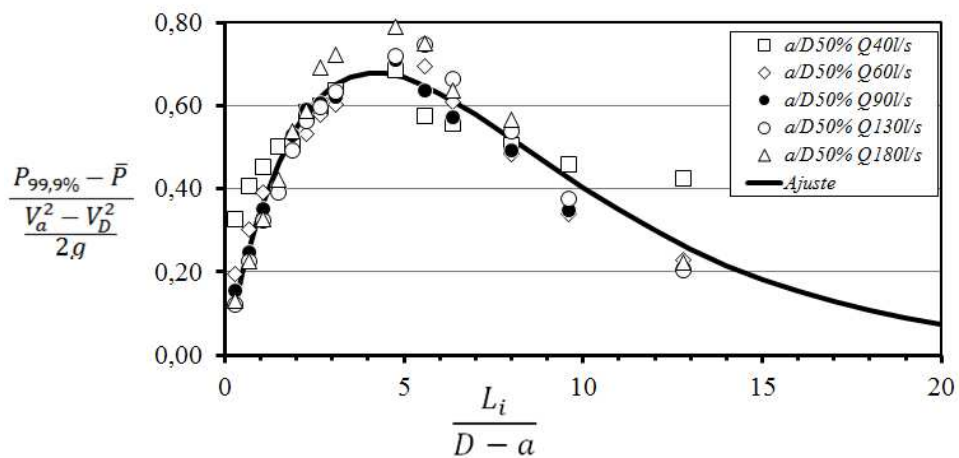


Figura 4.185 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.

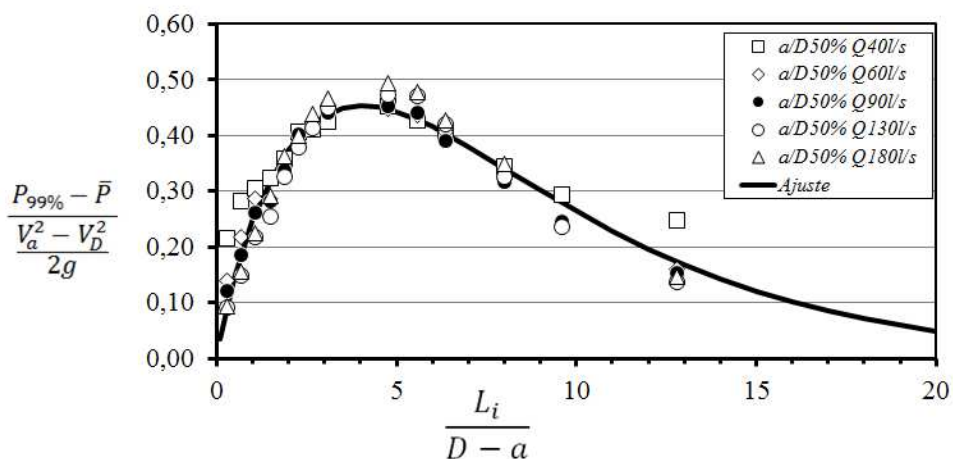


Figura 4.186 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.

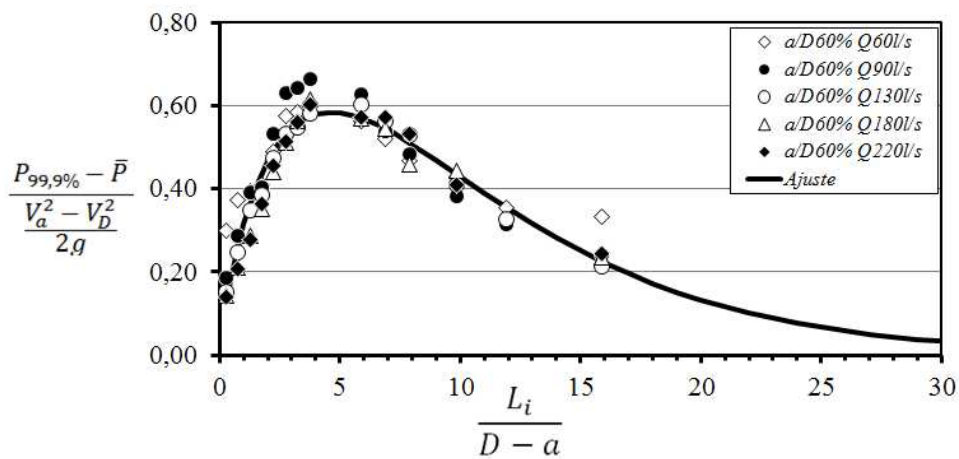


Figura 4.187 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.

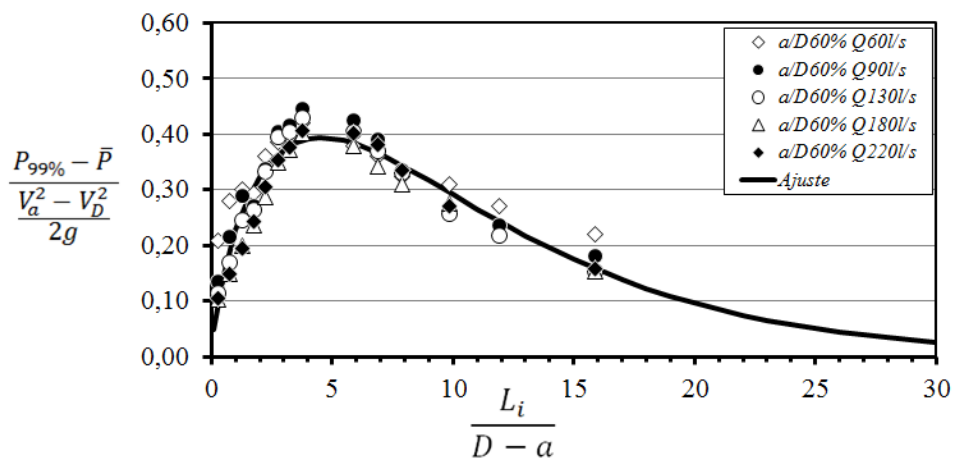


Figura 4.188 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.

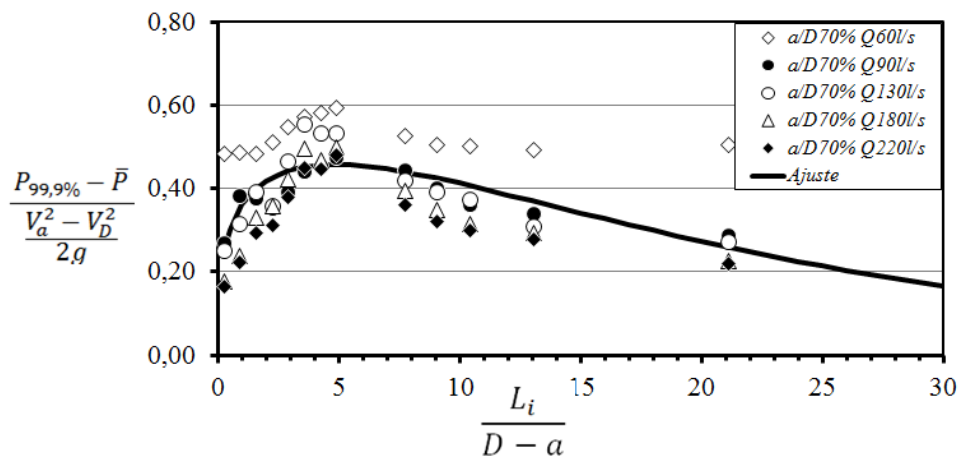


Figura 4.189 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.

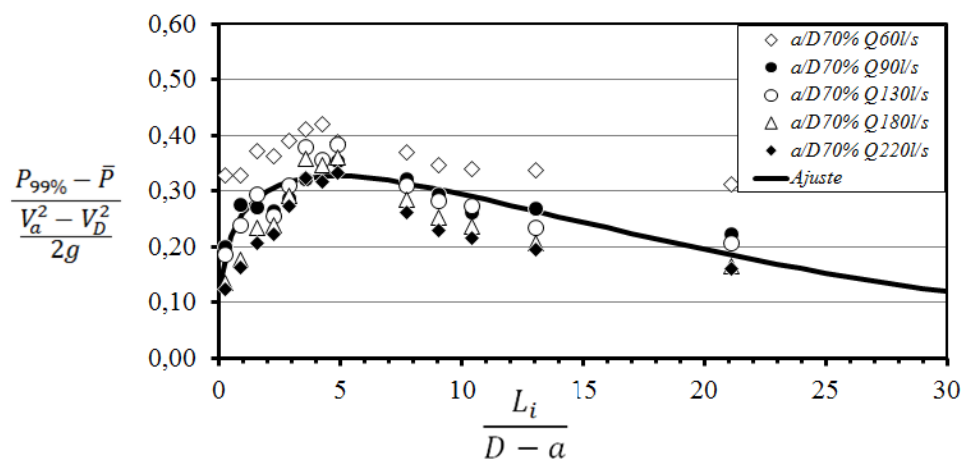


Figura 4.190 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.

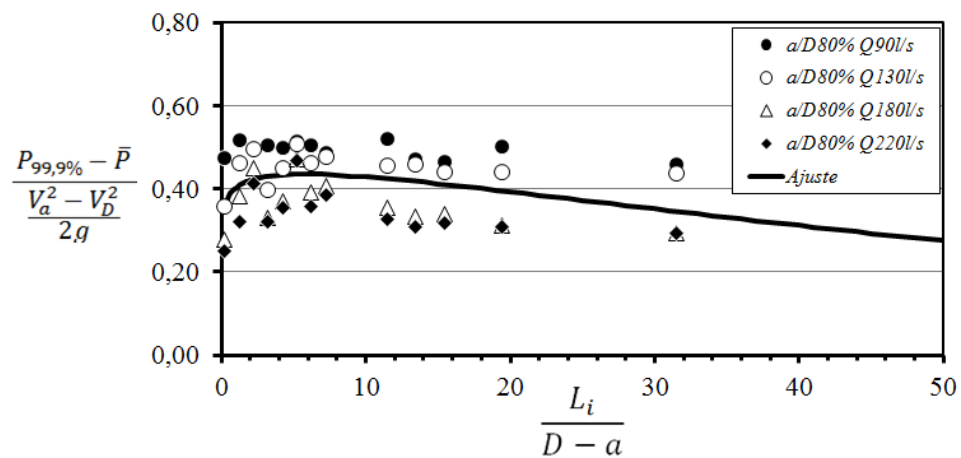


Figura 4.191 - $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.

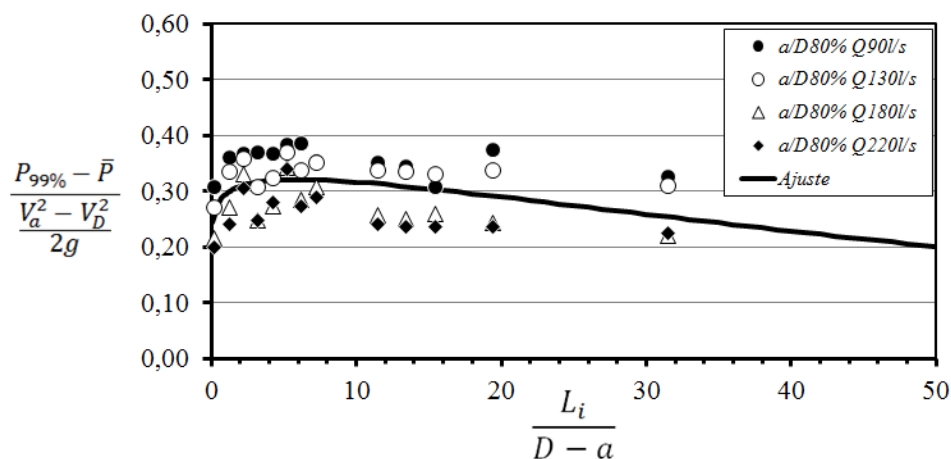


Figura 4.192 - $CP_{99\%}$ para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.

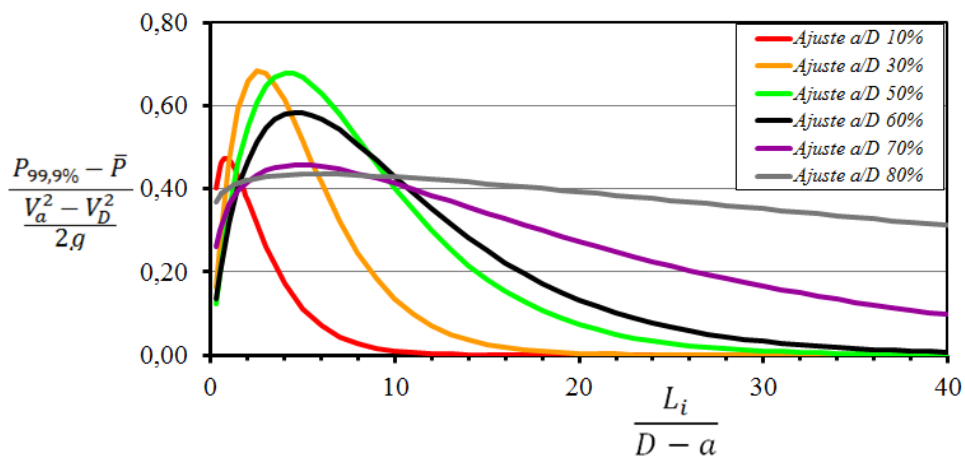


Figura 4.193 - Ajustes de $CP_{99,9\%}$ para a base do conduto.

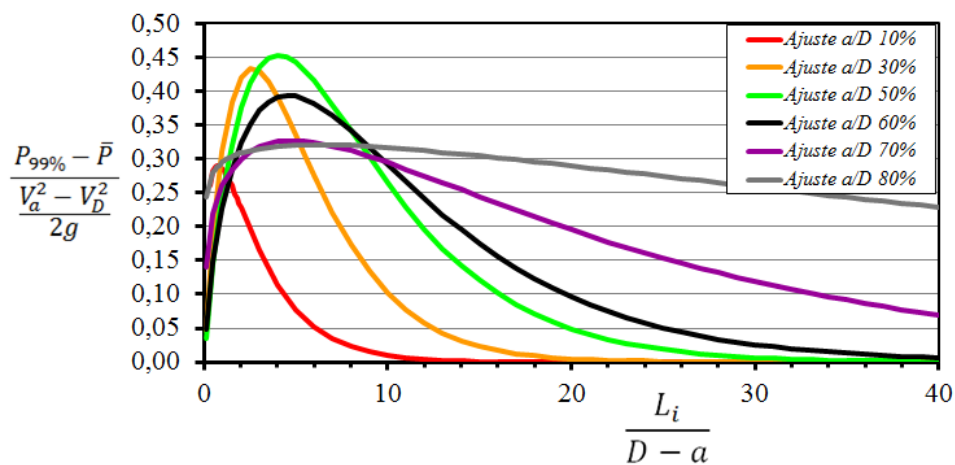


Figura 4.194 - Ajustes de $CP_{99\%}$ para a base do conduto.

Os valores dos coeficientes de pressão máxima junto à base do conduto tenderam a aumentar com o aumento da distância da comporta até um limite a partir do qual começam a diminuir. Os maiores valores de $CP_{99,9\%}$ e de $CP_{99\%}$ foram atingidos para 30% e 50% de abertura da comporta.

4.5.3.2 COEFICIENTES DE PRESSÃO MÁXIMA JUNTO AO TETO DO CONDUTO

Para o teto do conduto, as relações entre $CP_{99,9\%}$ e $CP_{99\%}$, e o coeficiente da posição adimensional (L_{adm}) foram mais bem representadas, para cada grau de abertura da comporta, pelas funções racionais apresentadas nas Equações 4.34 e 4.35, respectivamente. Os coeficientes ct_i e dt_i estão apresentados, respectivamente, na Tabela 4.15 e na Tabela 4.16, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais.

$$CP_{99,9\%} = \frac{ct_1 + ct_2 L_{adm}}{1 + ct_3 L_{adm} + ct_4 L_{adm}^2} \quad 4.34$$

$$CP_{99\%} = \frac{dt_1 + dt_2 L_{adm}}{1 + dt_3 L_{adm} + dt_4 L_{adm}^2} \quad 4.35$$

Nas equações ajustadas para as condições com 50% e 70% de abertura da comporta foram desconsiderados os dados das vazões de 40 l/s e 60 l/s, respectivamente.

Tabela 4.15 - Coeficientes para a Equação 4.34 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
ct_1	0,0322	0,1420	0,1604	0,2104	0,2837	0,5193
ct_2	-0,0009	0,0060	0,0464	0,0628	0,0901	0,1963
ct_3	-0,3243	-0,1988	-0,1905	-0,1641	-0,1524	-0,1278
ct_4	0,0349	0,0194	0,0254	0,0222	0,0225	0,0281
Desvio Padrão	0,009	0,063	0,043	0,051	0,052	0,089
Coeficiente de correlação (R²)	0,95	0,72	0,95	0,95	0,97	0,97

Tabela 4.16 - Coeficientes para a Equação 4.35 que estabelece a relação entre L_{adm} e $CP_{99\%}$ para o teto do conduto.

Coeficiente	a/D 10%	a/D 30%	a/D 50%	a/D 60%	a/D 70%	a/D 80%
dt_1	0,0228	0,0858	0,1175	0,1540	0,2061	0,4058
dt_2	-0,0011	0,0019	0,0220	0,0353	0,0621	0,1295
dt_3	-0,3334	-0,2480	-0,2144	-0,1816	-0,1441	-0,0773
dt_4	0,0359	0,0245	0,0251	0,0226	0,0225	0,0239
Desvio Padrão	0,005	0,029	0,022	0,027	0,029	0,049
Coeficiente de correlação (R^2)	0,96	0,88	0,97	0,97	0,98	0,97

As equações ajustadas para representar o comportamento das flutuações de pressões ao longo do teto do conduto apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais iguais ou superiores a 0,88. O maior desvio padrão foi registrado para a condição com 80% de abertura da comporta.

Da Figura 4.195 até a Figura 4.206 apresentam-se as comparações entre os dados experimentais e as curvas ajustadas para representar a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para o teto do conduto e os seguintes graus de abertura da comporta: 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. A Figura 4.207 e a Figura 4.208 mostram em um mesmo gráfico todas as curvas ajustadas $CP_{99,9\%}$ e $CP_{99\%}$.

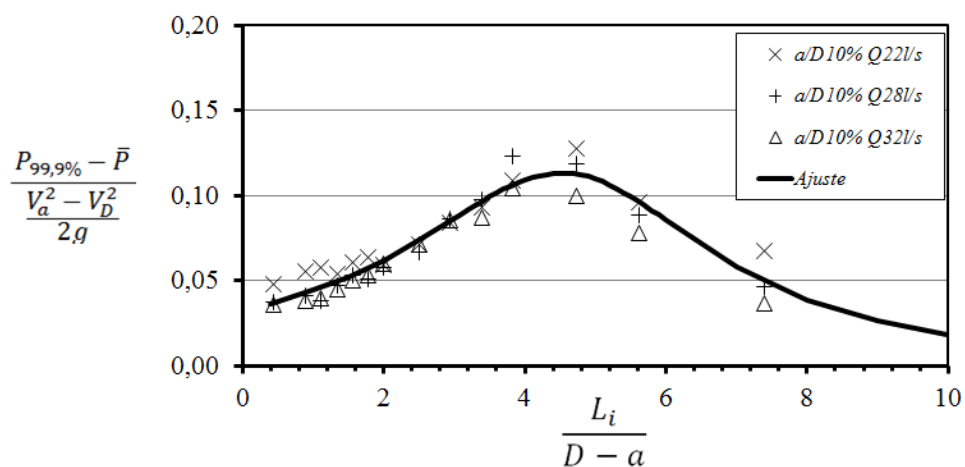


Figura 4.195 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.

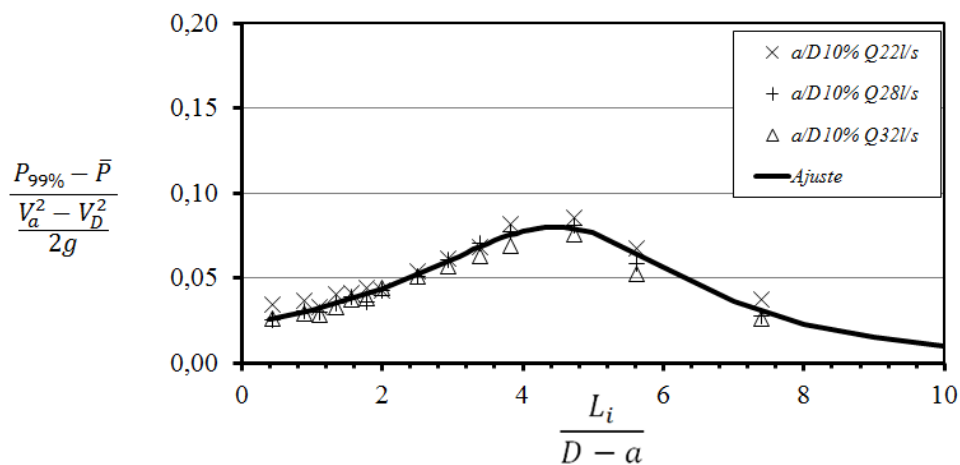


Figura 4.196 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.

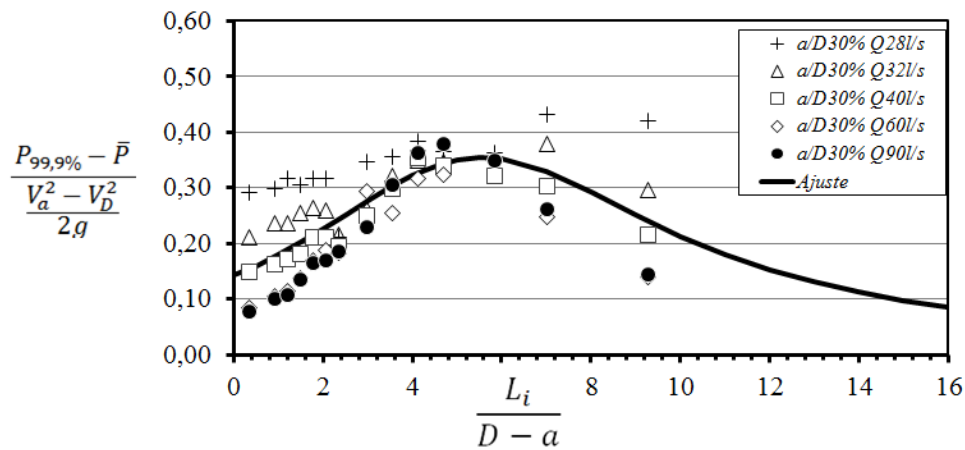


Figura 4.197 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.

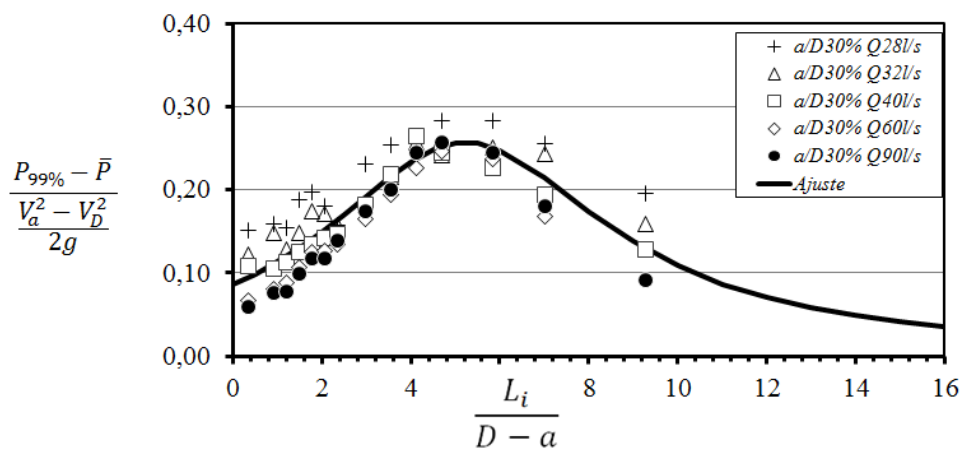


Figura 4.198 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.

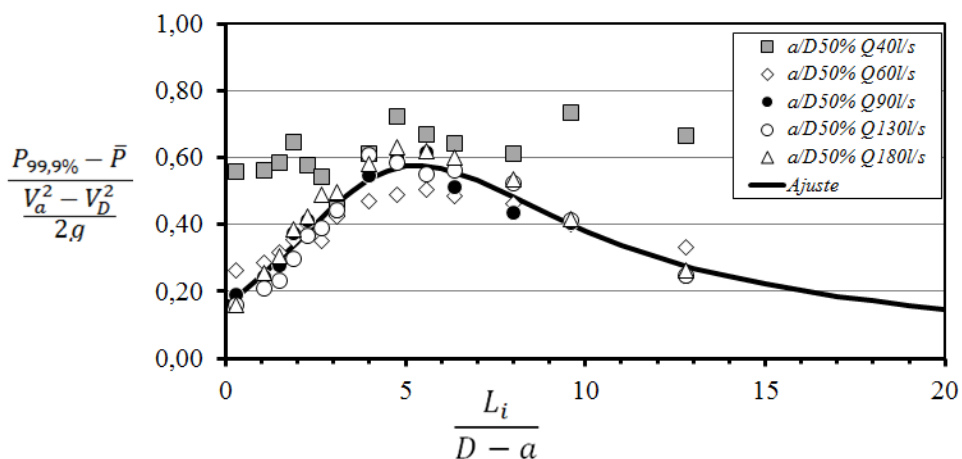


Figura 4.199 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.

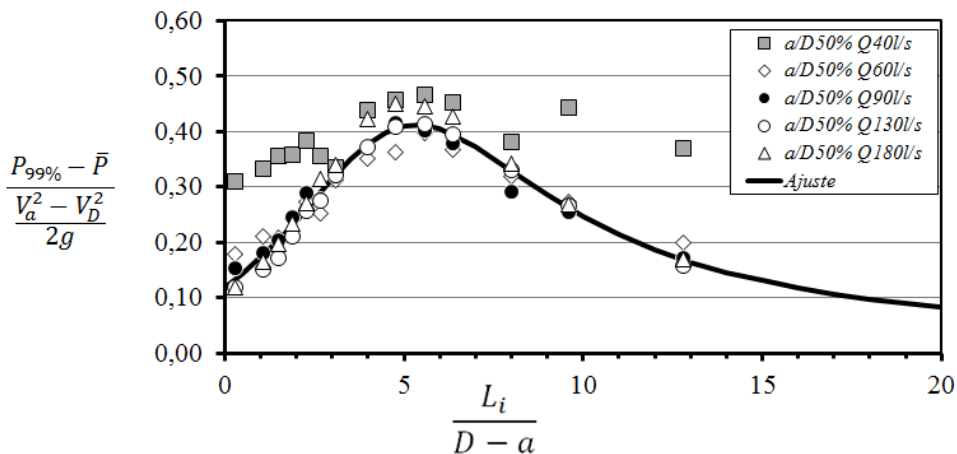


Figura 4.200 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.

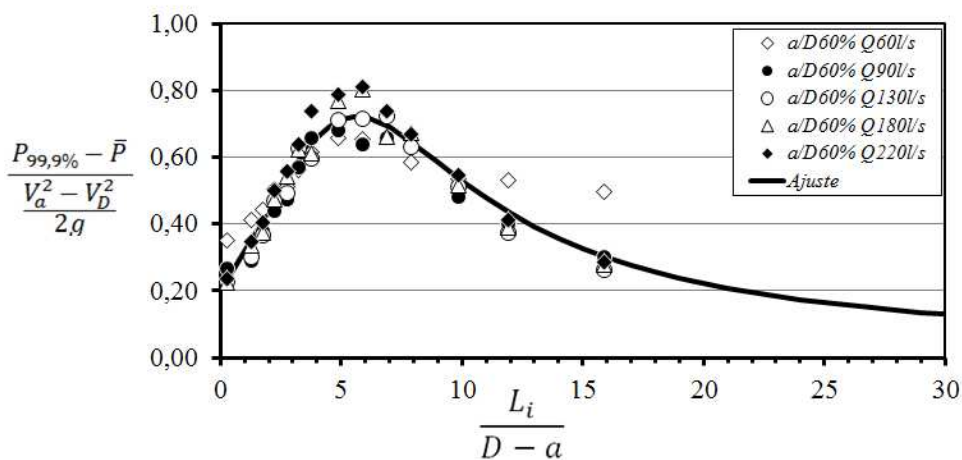


Figura 4.201 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.

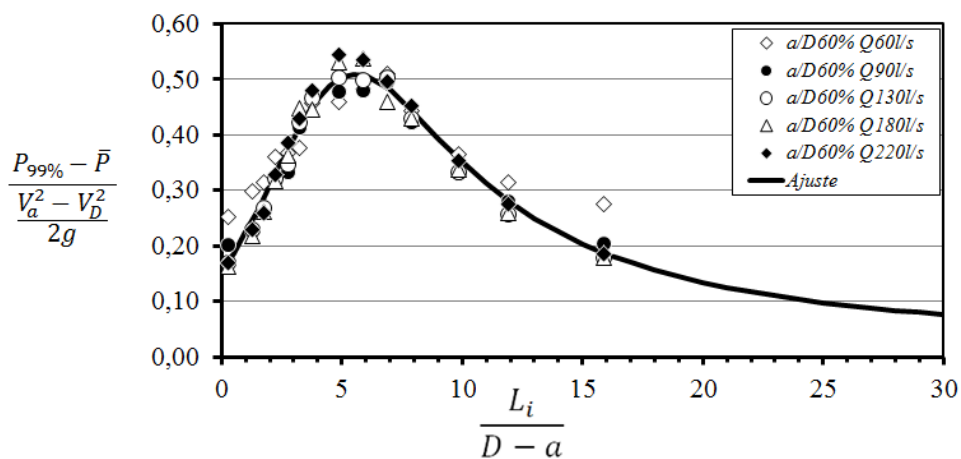


Figura 4.202 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.

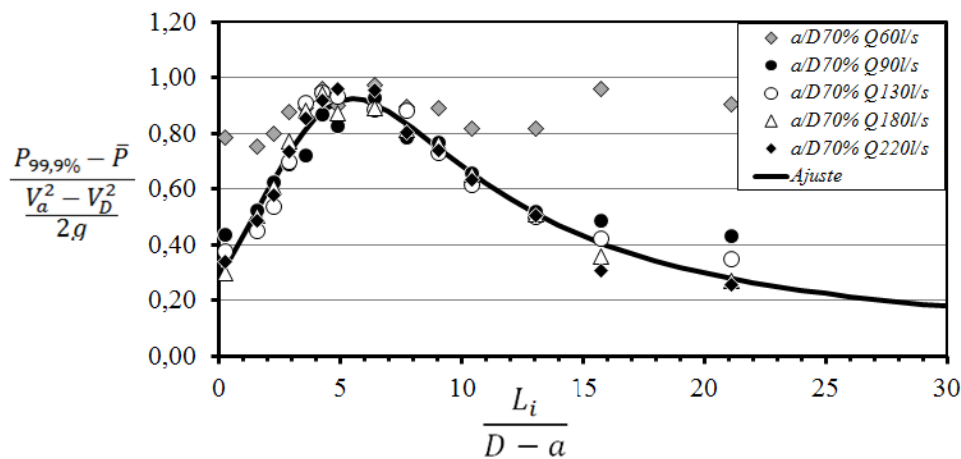


Figura 4.203 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.

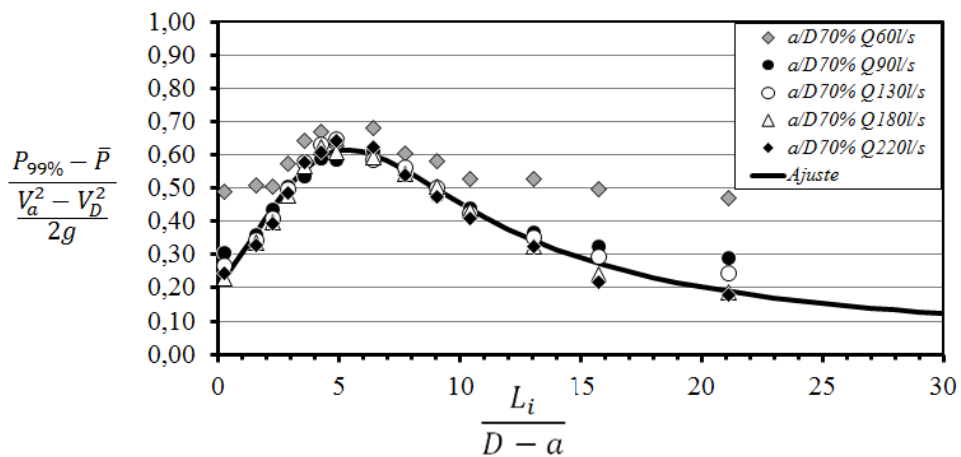


Figura 4.204 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.

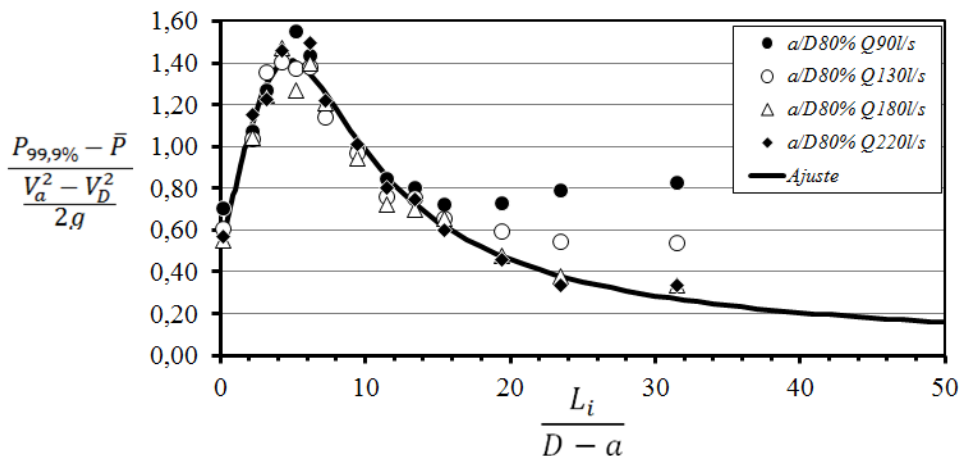


Figura 4.205 - $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.

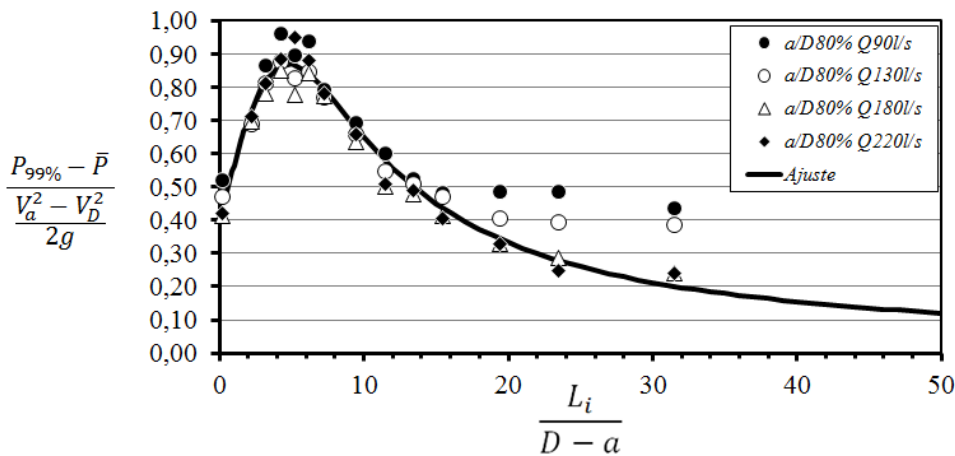


Figura 4.206 - $CP_{99\%}$ para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.

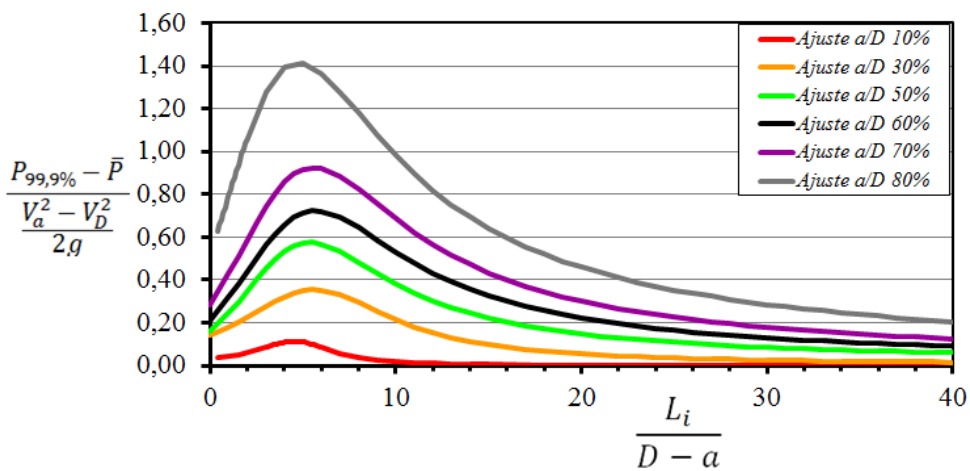


Figura 4.207 - Ajustes de $CP_{99,9\%}$ para o teto do conduto.

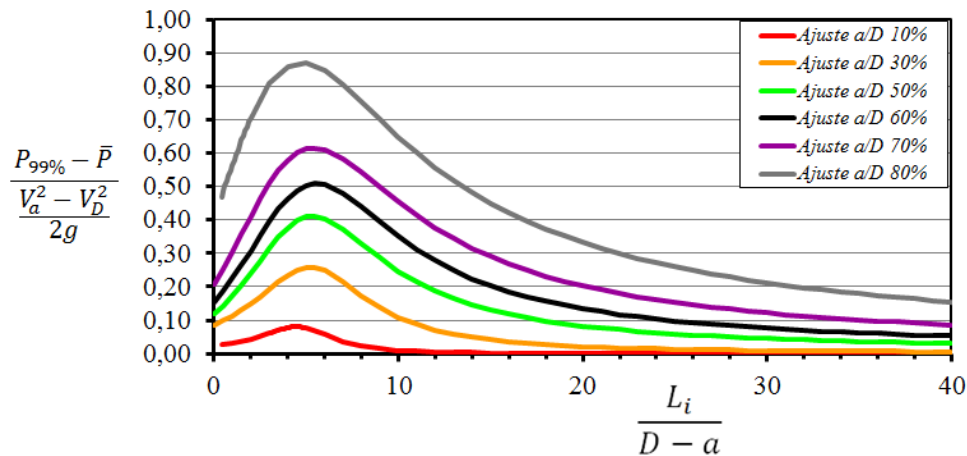


Figura 4.208 - Ajustes de $CP_{99\%}$ para o teto do conduto.

Os valores dos coeficientes de pressão máxima junto ao teto do conduto tenderam a aumentar com o aumento da distância da comporta até um limite a partir do qual começam a diminuir. Os valores de $CP_{99,9\%}$ e de $CP_{99\%}$ foram maiores com o aumento da abertura da comporta.

4.5.4 COEFICIENTE DE ASSIMETRIA DA DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES INSTANTÂNEAS

O coeficiente de assimetria representa a distribuição de valores em torno da média. As assimetrias negativas concentram a maior quantidade de registros de pressão instantânea abaixo da média e, segundo Lopardo (1986), estão associadas com o descolamento do escoamento com a borda sólida. As assimetrias positivas concentram a maior quantidade de registros de pressão instantânea acima da média.

Na região do jato na base do conduto, próxima à comporta, os valores do coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas foram positivos e, com o aumento da distância da comporta e a expansão do jato, apresentou-se uma tendência de descolamento do escoamento da base.

Na zona de recirculação junto ao teto do conduto, os coeficientes de assimetria apresentaram valores negativos. Com o aumento da distância à comporta, o jato se expandiu desde a base e atingiu o teto do conduto, tornando os valores do coeficiente de assimetria positivos.

Para auxiliar na visualização dessas observações, a Figura 4.209 apresenta o coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e vazão de 32 l/s e a Figura 4.210 mostra o coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.

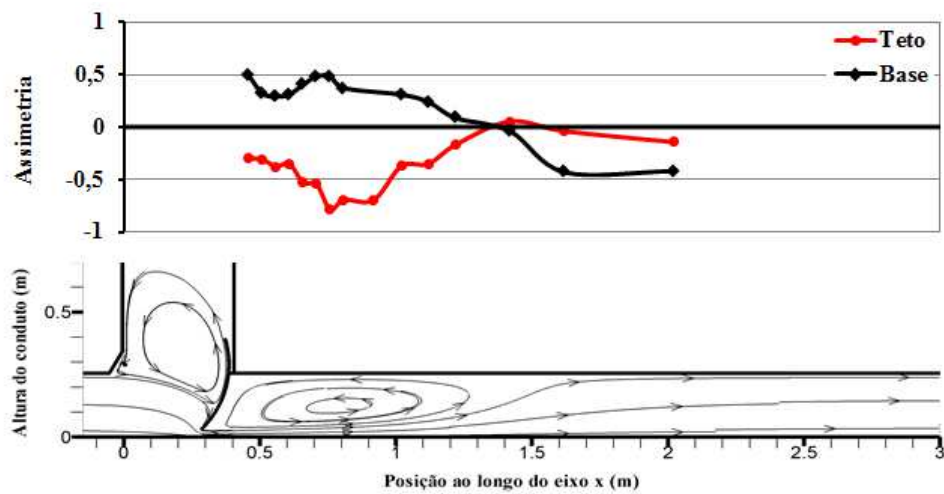


Figura 4.209 - Coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto para a condição com 10% de abertura da comporta e vazão de 32 l/s.

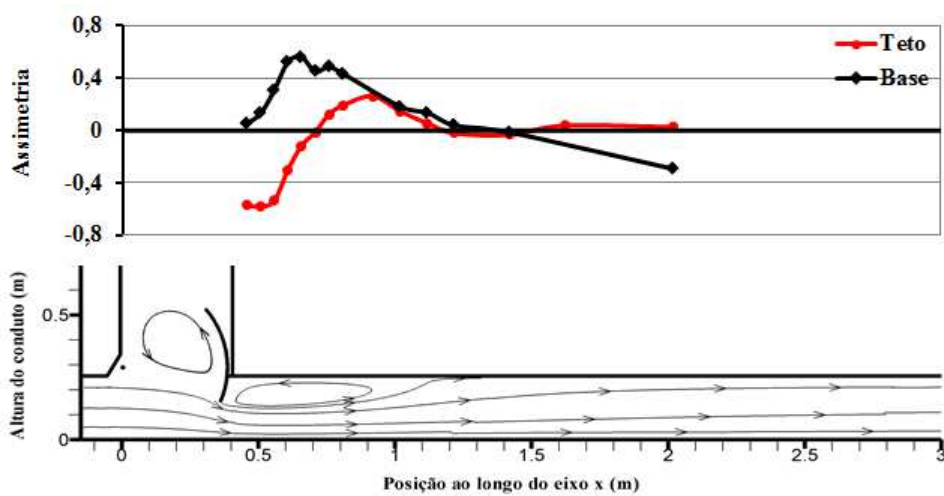


Figura 4.210 - Coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto para a condição com 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.

Da Figura 4.211 até a Figura 4.216 são apresentados os gráficos do coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas na base do conduto e da Figura 4.217 até a Figura 4.222 os gráficos do coeficiente de assimetria no teto do conduto.

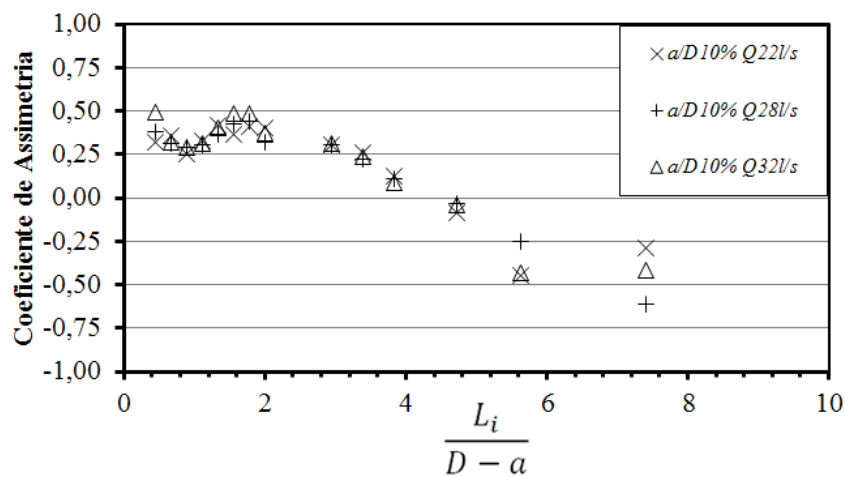


Figura 4.211 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 10% de abertura da comporta.

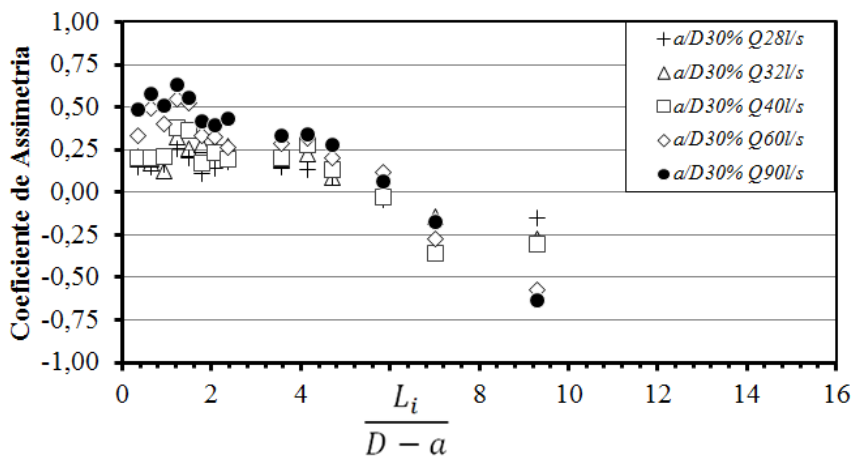


Figura 4.212 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 30% de abertura da comporta.

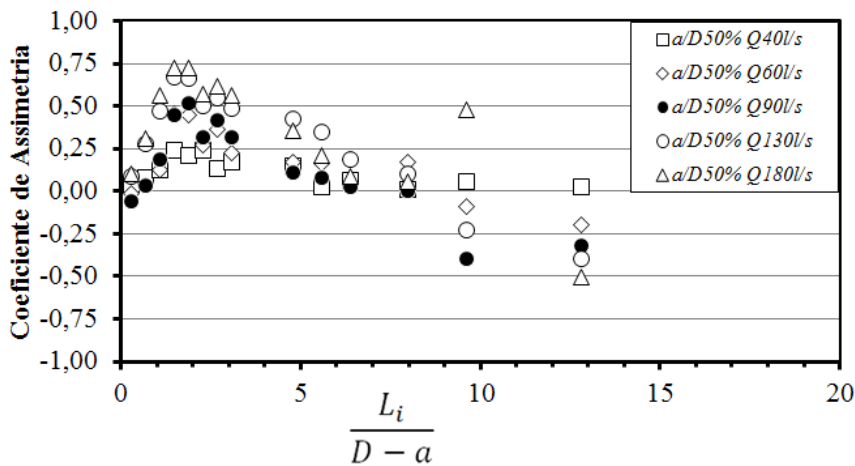


Figura 4.213 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 50% de abertura da comporta.

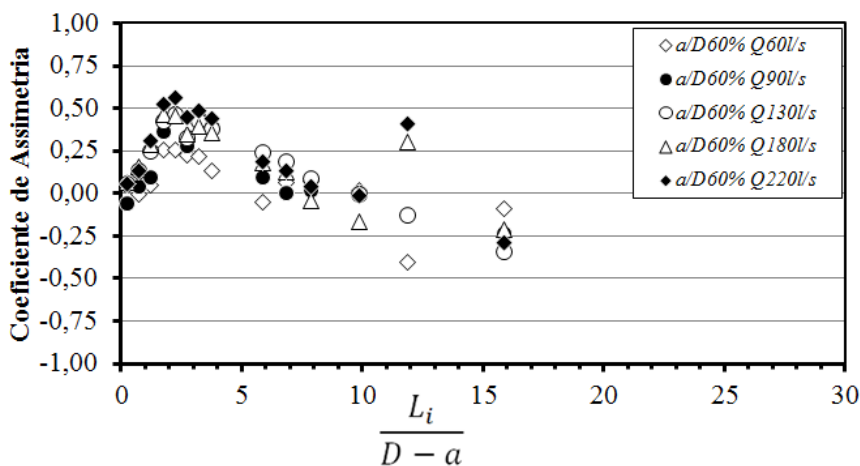


Figura 4.214 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 60% de abertura da comporta.

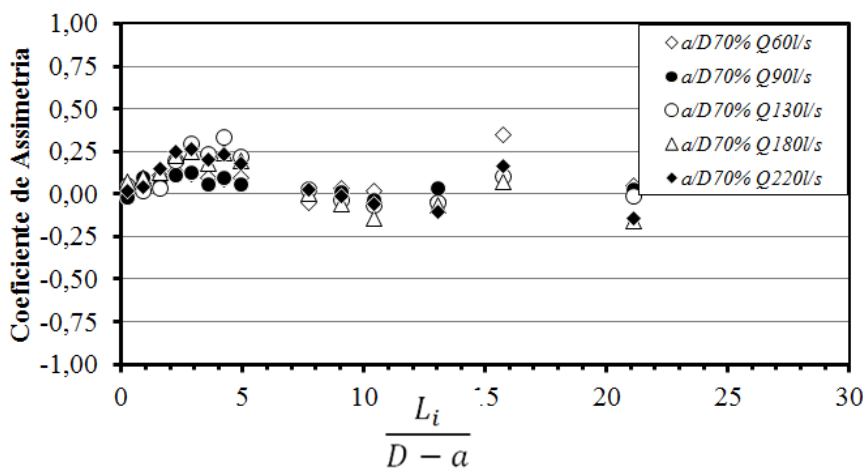


Figura 4.215 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 70% de abertura da comporta.

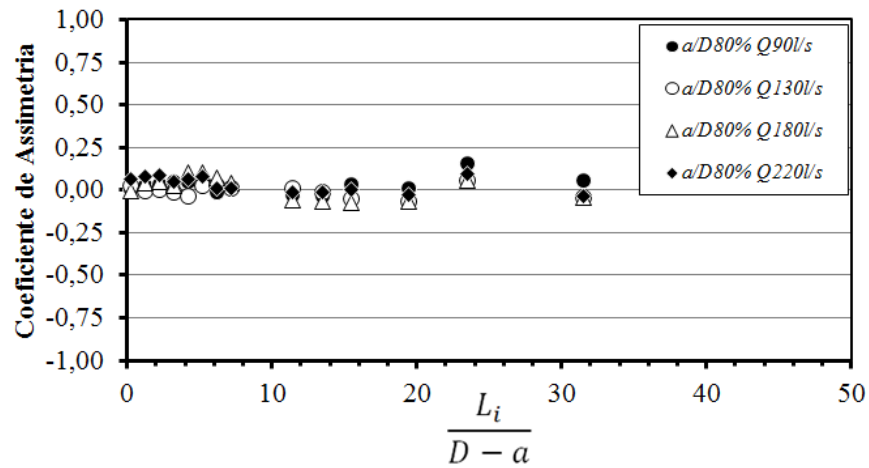


Figura 4.216 - Coeficiente de assimetria para a base do conduto e 80% de abertura da comporta.

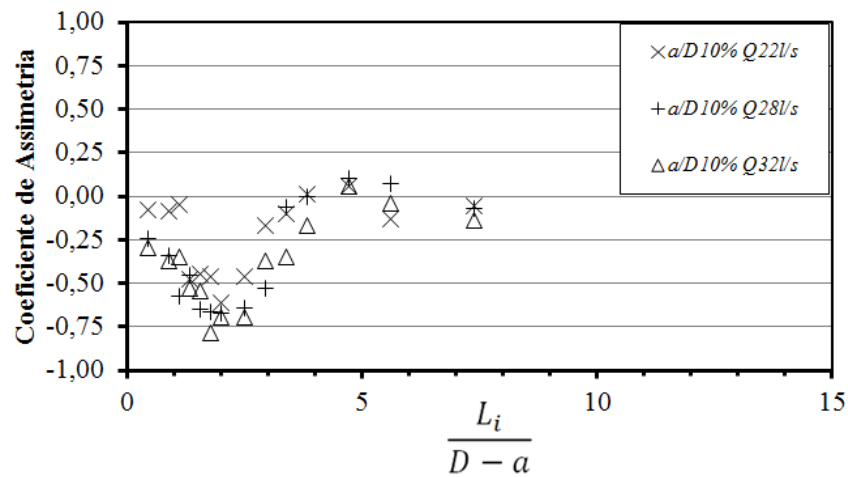


Figura 4.217 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 10% de abertura da comporta.

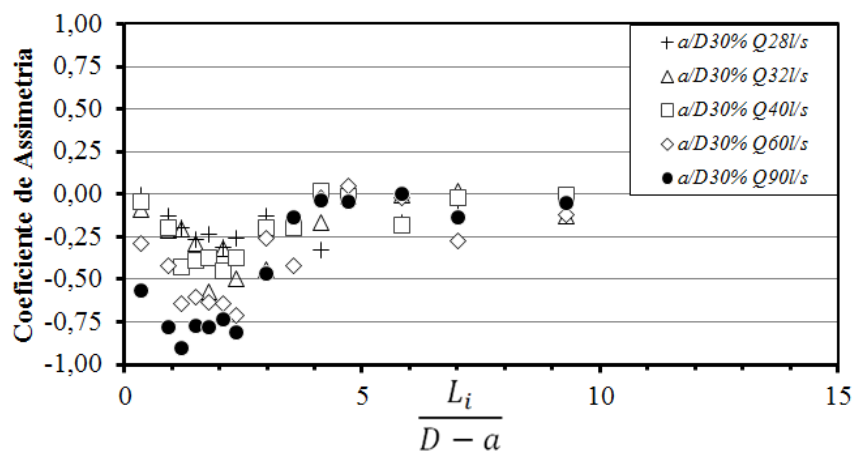


Figura 4.218 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 30% de abertura da comporta.

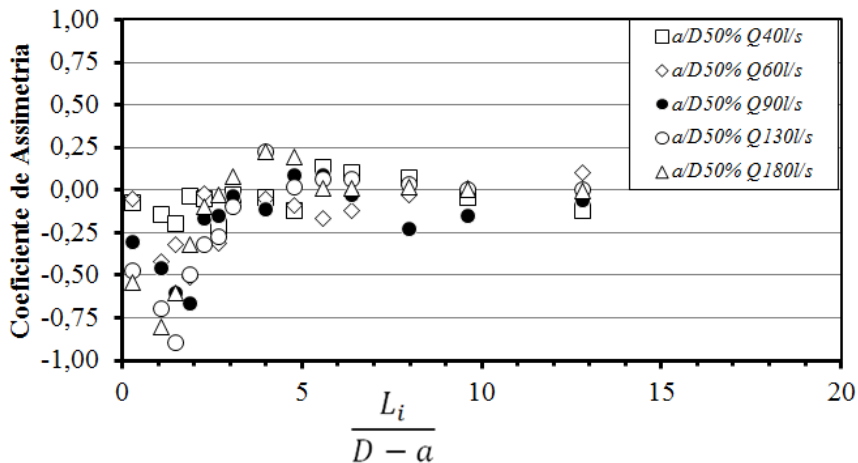


Figura 4.219 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 50% de abertura da comporta.

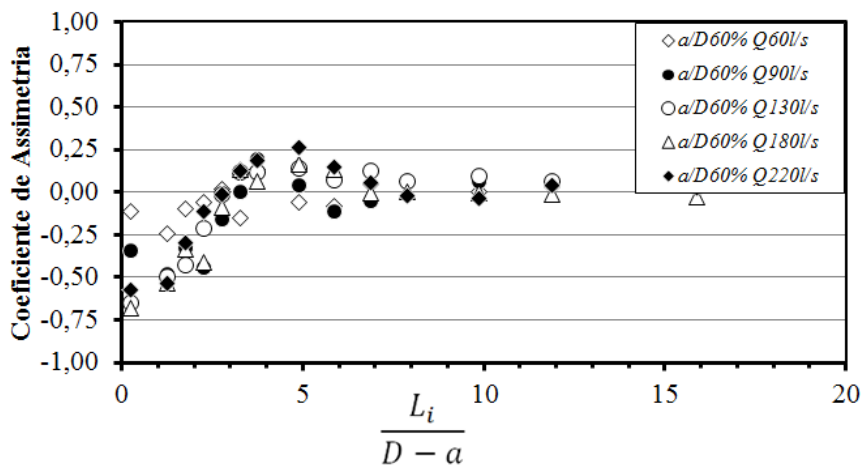


Figura 4.220 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 60% de abertura da comporta.

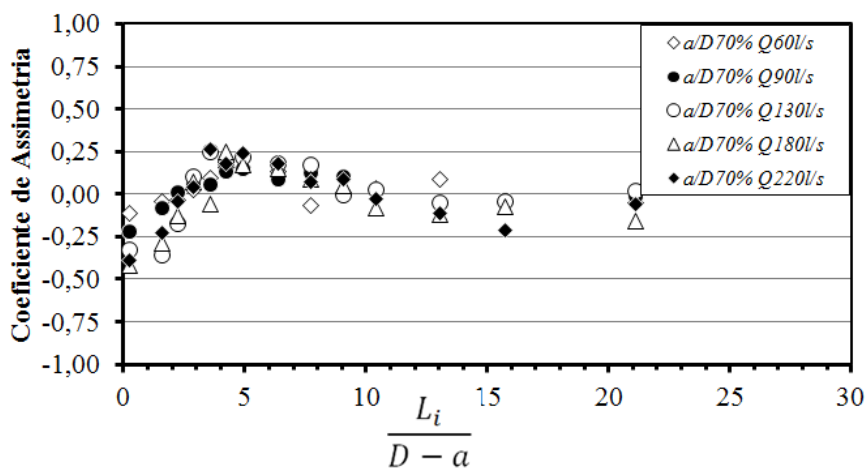


Figura 4.221 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 70% de abertura da comporta.

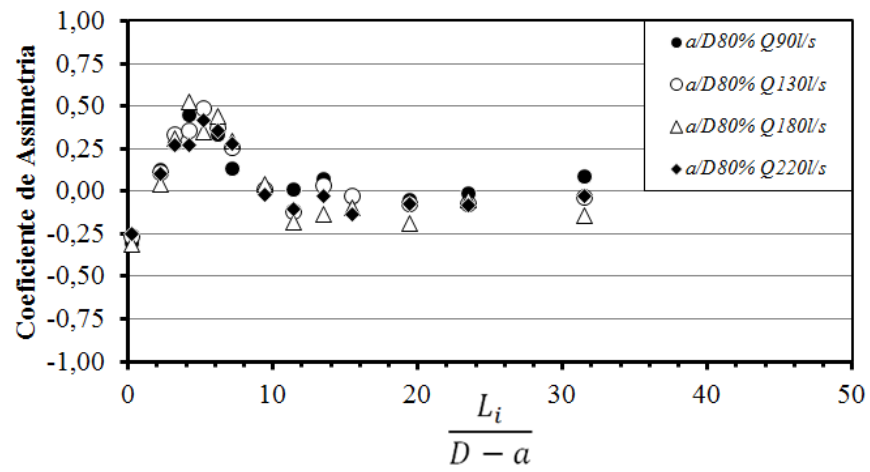


Figura 4.222 - Coeficiente de assimetria para o teto do conduto e 80% de abertura da comporta.

Capítulo V

5 CONCLUSÕES

As Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário apresentam metas ambiciosas para os próximos anos quanto à construção de eclusas e ao aumento da participação do transporte aquaviário de carga na matriz brasileira.

Conforme verificado na bibliografia, a transposição de desníveis com a construção do menor número eclusas se mostra como a opção de menor custo, o que resulta na transposição individual de desníveis significativos. Os problemas hidráulicos encontrados junto às comportas de enchimento e esvaziamento, especialmente a cavitação, estão entre as principais limitações para o aumento da altura de queda das eclusas.

Nesta pesquisa buscou-se o aprofundamento dos conhecimentos sobre a dinâmica do escoamento junto às comportas dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas, de modo a subsidiar a concepção de soluções técnicas que permitam a construção segura de eclusas de queda mais elevada que as atualmente viabilizadas.

Para tanto, foram realizadas simulações experimentais, em modelo físico reduzido, e numéricas, com o software *Flow-3D*® de Dinâmica de Fluidos Computacional. A partir dos resultados, foram possíveis a verificação da aplicabilidade desse software na simulação do escoamento médio e a análise de parâmetros hidráulicos desse escoamento, sem aeração e em regime permanente, e das pressões médias e instantâneas ao longo do teto e da base do conduto a jusante da comporta do tipo segmento invertida.

Foram estabelecidas relações que descrevem o comportamento das pressões médias e instantâneas ao longo da base e do teto do conduto, a partir de coeficientes adimensionais de pressão e de posição, para graus de abertura da comporta iguais a 10%, 30%, 50%, 60%, 70% e 80%. Dessa forma, as relações podem auxiliar no cálculo das pressões médias e instantâneas para estruturas semelhantes e são de simples aplicação, uma vez que utilizam parâmetros da estrutura e do escoamento facilmente determináveis.

As relações são válidas para escoamentos com número de Reynolds superior a 300.000, sendo este calculado a partir da consideração da altura do conduto, como dimensão de referência, e da velocidade média na seção da comporta.

Na sequência são apresentados os principais pontos verificados com esta pesquisa.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS JUNTO AO TETO E À BASE DO CONDUTO

Com relação ao comportamento das pressões médias, a partir da análise dos dados experimentais, para os escoamentos com a comporta parcialmente aberta, observou-se que:

- A pressão na base do conduto a jusante da comporta diminui até encontrar a seção da *vena contracta*, trecho onde a energia potencial é convertida em energia cinética;
- A partir da seção da *vena contracta* a energia cinética volta a se converter em energia potencial e percebeu-se o aumento gradativo das pressões na base do conduto até encontrar o equilíbrio com a energia potencial necessária para vencer as perdas de carga até o reservatório de jusante; e
- No teto do conduto, as menores pressões medidas foram as mais próximas à comporta, na região de recirculação do escoamento.

Para uma mesma vazão, os menores valores de pressão média na base e no teto foram registrados para os menores graus de abertura da comporta testados. No entanto, a vazão é função do grau de abertura e da diferença de carga hidráulica (ΔH) entre montante e jusante da comporta e, nas eclusas de navegação, a queda determina as vazões máximas para cada abertura da comporta. Nesse sentido, verificou-se que:

- Para um mesmo $\Delta H/D > 1,5$, as tendências demonstraram que as menores pressões médias mínimas na base do conduto seriam atingidas para 60% de abertura da comporta, seguido pelas aberturas de 50% e 70%; e
- Para um mesmo $\Delta H/D > 1,5$, as tendências demonstraram que as menores pressões médias mínimas no teto do conduto seriam atingidas para 70% de abertura da comporta, seguido pelas aberturas de 60% e 80%.

Para a determinação do coeficiente de pressão média, foi importante a subtração da pressão média que ocorreria para 100% de abertura da comporta, permitindo o tratamento isolado da influência do grau de abertura da comporta no comportamento das pressões. Com relação aos coeficientes adimensionais de pressão média, observou-se o seguinte:

- Os coeficientes de pressão média na base do conduto tenderam a apresentar valores que diminuem conforme aumenta a distância da comporta até determinado ponto a partir do qual os valores dos coeficientes passam a aumentar;
- O menor valor do coeficiente de pressão média para a base do conduto foi atingido para o grau de abertura da comporta igual a 60%; e
- Os coeficientes de pressão média no teto do conduto tenderam a apresentar valores que aumentam conforme aumenta a distância da comporta e os valores mínimos do coeficiente diminuíram conforme aumentou o grau de abertura da comporta.

5.2 AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO SOFTWARE DE DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL, FLOW 3D®, NA SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO MÉDIO

Os resultados das simulações realizadas no *Flow-3D®* com o modelo de turbulência $k-\epsilon$ demonstraram a sua aplicabilidade no estudo do escoamento médio a jusante de comportas de sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas.

O modelo numérico representou a pressão média a montante da comporta e os formatos das curvas de pressão média ao longo da base e do teto do conduto a jusante da comporta, apresentando resultados mais aderentes para a base. As velocidades numéricas e experimentais se apresentaram na mesma ordem de grandeza e os melhores ajustes do formato do perfil de velocidades foram obtidos para a vazão de referência de 220 l/s.

Foram especialmente importantes para a representação do escoamento, a escolha do tamanho das células da malha de cálculo, a extensão do bloco 1 para o desenvolvimento do perfil de velocidades, o correto lançamento da estrutura e as condições de contorno.

Para o refinamento dos resultados numéricos e a maior aderência aos dados experimentais de pressão média junto à base e ao teto do conduto e de velocidade média a montante da comporta, foram relevantes o ajuste das rugosidades das paredes do conduto e a inserção de um valor de energia cinética turbulenta como condição de contorno de montante.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO MÉDIO

A caracterização do escoamento médio no interior do conduto foi feita a partir dos resultados das simulações numéricas realizadas no *Flow-3D*®.

Para o escoamento com a comporta parcialmente aberta, observou-se que:

- As linhas de corrente caracterizaram o direcionamento do fluxo para a passagem sob a comporta e também a formação de dois grandes vórtices, um no poço da comporta e outro a jusante da comporta entre ela e o teto do conduto;
- As máximas velocidades positivas na direção x foram verificadas na região do jato, em um campo de velocidades de formato cônico, e os máximos valores foram atingidos na seção da *vena contracta*;
- As máximas velocidades negativas na direção x ocorreram nas proximidades do teto do conduto a jusante da comporta, no encontro com a isolinha de velocidade na direção z igual a 0 m/s, na região de recirculação do escoamento;
- Os campos de velocidade na direção z demonstraram que as maiores velocidades ascendentes e descendentes decorreram do impacto do escoamento com a comporta;
- A jusante da comporta ficou caracterizada uma região de velocidade ascendente na área de expansão do jato e uma região de velocidade descendente nas proximidades da face de jusante da comporta;
- Os campos de pressão evidenciaram a perda de energia potencial causada pela comporta e as zonas com as menores pressões como sendo a junto ao

terminal da comporta e a próxima ao teto do conduto a jusante da comporta;

- Houve formação de campos de energia cinética turbulenta que tenderam a se expandir em direção ao teto do conduto, preservando uma área, de formato cônico e próxima à comporta e à base do conduto, com energias próximas de $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$;
- Os maiores valores de energia cinética turbulenta foram observados nas regiões que abrangem a expansão do jato e a área de alimentação da recirculação a jusante da comporta;
- Ocorreu a formação de um campo de energia cinética turbulenta que demonstra o desprendimento de vórtices do teto do conduto a montante do poço da comporta em direção ao terminal da comporta, o que poderia ser uma fonte causadora de vibrações nessa estrutura;
- Os maiores valores de dissipação de energia cinética turbulenta foram observados próximos à comporta, na zona de contato entre o jato e a recirculação e junto à base do conduto.

5.4 IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DA ESTRUTURA SUBMETIDAS ÀS MAIORES SOLICITAÇÕES

As maiores solicitações das estruturas estão relacionadas às velocidades e às pressões capazes de gerar danos e especialmente ligadas à ocorrência de cavitação. Como a cavitação não ocorre na escala do modelo físico, os dados foram transpostos para a escala de protótipo, considerando-se a relação geométrica de 1:16.

Para as condições avaliadas com 10% e 30% de abertura da comporta, as zonas com pressões capazes de desencadear o fenômeno da cavitação concentram-se junto ao terminal da comporta e, nesses casos, acredita-se que as paredes laterais do conduto seriam expostas ao colapso das cavidades de vapor que se formariam. Junto à base do conduto a jusante da comporta, as velocidades estimadas superaram 25 m/s, demandando atenção especial para a prevenção de danos à estrutura.

Para os casos avaliados com 50% e 60% de abertura da comporta, as zonas com pressões capazes de desencadear o fenômeno da cavitação abrangeram as áreas que foram do terminal ao teto a jusante da comporta e, misturadas ao jato, teriam a tendência de ser lançadas contra o teto do conduto. As velocidades estimadas foram superiores a 32 m/s na região do jato, junto à base do conduto a jusante da comporta.

Os dados de pressão e velocidades médias demonstraram a necessidade de tratamento especial em todas as paredes do conduto a jusante da comporta e são orientadoras para a determinação da resistência dos materiais a serem aplicados na estrutura, devendo ainda ser observadas as pressões e velocidades instantâneas. As áreas com as menores pressões médias junto ao teto e com as maiores velocidades médias junto à base devem ser observadas com interesse pelos projetistas para a adoção de soluções que visem reduzir o potencial de cavitação e erosão.

5.5 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES INSTANTÂNEAS E DE SEUS VALORES EXTREMOS JUNTO AO TETO E À BASE DO CONDUTO

A partir dos dados experimentais, foi possível observar que as flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto foram influenciadas pela abertura da comporta e pela vazão. As maiores flutuações de pressão na base se afastaram da comporta conforme aumentou o grau de abertura, e as maiores flutuações de pressão no teto se aproximaram da comporta conforme aumentou o grau de abertura, sendo que a posição do pico das flutuações de pressão ocorreu na região onde a expansão do jato atingiu o teto.

Com relação aos coeficientes adimensionais de flutuação de pressão, observou-se o seguinte:

- Os dados demonstram que os coeficientes de flutuação de pressão para a base do conduto aumentaram de valor com o aumento da distância da comporta e atingiram um limite para então diminuir com o aumento da distância;
- O maior valor para o coeficiente de flutuação da pressão foi atingido para 50% de abertura da comporta;

- Os valores do coeficiente de flutuação de pressão no teto do conduto tenderam a aumentar com o aumento da distância da comporta até um limite a partir do qual começaram a diminuir; e
- Conforme aumentou o grau de abertura da comporta, aumentaram os valores do coeficiente de flutuação de pressão no teto do conduto.

Com relação aos coeficientes adimensionais de pressão mínima, observou-se que:

- Os coeficientes de pressão mínima na base e no teto do conduto tenderam a apresentar valores que diminuem conforme aumenta a distância da comporta até determinado ponto a partir do qual os valores dos coeficientes passam a aumentar;
- Os menores valores de $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$ para a base do conduto foram atingidos para 30% e 50% de abertura da comporta; e
- Conforme aumentou o grau de abertura da comporta, diminuíram os valores de $CP_{0,1\%}$ e $CP_{1\%}$ para o teto do conduto.

Com relação aos coeficientes adimensionais de pressão máxima, verificou-se que:

- Os valores dos coeficientes de pressão máxima junto à base e ao teto do conduto tenderam a aumentar com o aumento da distância da comporta até um limite a partir do qual começam a diminuir;
- Os maiores valores de $CP_{99,9\%}$ e de $CP_{99\%}$ na base do conduto foram atingidos para 30% e 50% de abertura da comporta; e
- Os valores de $CP_{99,9\%}$ e de $CP_{99\%}$ no teto do conduto foram maiores conforme aumentou a abertura da comporta.

Na região do jato na base do conduto próxima à comporta, os valores do coeficiente de assimetria da distribuição das pressões instantâneas foram positivos e, com o aumento da distância da comporta e a expansão do jato, apresentou-se a tendência de inversão de sinal da assimetria, indicando o descolamento do escoamento da base. Na zona de recirculação junto ao teto do conduto, os coeficientes de assimetria apresentaram valores negativos e, com o aumento da distância da comporta, o jato se expandiu desde a base até o teto do conduto, tornando os valores do coeficiente de assimetria positivos.

Capítulo VI

6 RECOMENDAÇÕES

No início desta pesquisa, os objetivos eram mais ambiciosos; encontrar alternativas geométricas que reduzissem a ocorrência de cavitação no escoamento junto às válvulas dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação, especialmente focada nos casos de estruturas existentes. Contudo, as lacunas de conhecimento existentes à época foram limitantes para o projeto das alternativas concebidas.

Com esta pesquisa, foi possível avançar no conhecimento sobre a dinâmica do escoamento a jusante de válvulas de sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação, caracterizando o escoamento, produzindo relações que permitem a predição de pressões e validando a utilização do software *Flow-3D*® na reprodução do escoamento médio.

Para a continuidade das pesquisas nesta área, recomenda-se:

- A realização de simulações experimentais e numéricas para mais graus de abertura da comporta, especialmente entre 50% e 70%;
- A realização de simulações experimentais e numéricas para maiores diferenciais de pressão entre montante e jusante da comporta;
- A utilização, de forma complementar, dos modelos físicos e dos modelos de dinâmica de fluidos computacional na busca por soluções técnicas que permitam a construção segura de eclusas de queda mais elevada que as atualmente viabilizadas e o aperfeiçoamento dos sistemas das eclusas existentes;
- A avaliação de outros modelos de turbulência na simulação do escoamento a jusante de válvulas de sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação; e
- A realização de simulações numéricas do escoamento a jusante de válvulas de sistema de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação com Large Eddy Simulation.

Referências Bibliográficas

1. ANDRADE, J.L.; AMORIM, J.C.C. *Análise dos esforços hidrodinâmicos em comportas hidráulicas*. IN: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória: 1997.
2. ARAUZ, I.J. *Vertedor de superfície e escoamento sob comportas*. Dissertação de mestrado, USP. São Paulo: 2005.
3. ARNDT, R.E.A. *Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures*. Annual Review in Fluid Mechanics, 13. 1981. p. 273-328.
4. AYDIN, I. *Air demand behind high head gates during emergency closure*. Journal of Hydraulic Research. 2002. v. 40. n° 1.
5. AYDIN, I.; TELCI, I.T.; DUNDAR, O. *Prediction of downpull on closing high head gates*. Journal of Hydraulic Research. 2006. v. 44. n° 6, p. 822-831.
6. BAUR, T.; KÖNGETER, J. *New aspects of research on the prediction of cavitation*. IN: IX International Conference on Hydropower Development. Bergen: 2001.
7. BILUŠ, I.; PREDIN, A.; ŠKERGET, L. *The extended homogeneous cavitation transport model*. Journal of Hydraulic Research. 2007. v. 45. n° 1, p. 81–87.
8. BORSARI, R. D. *A cavitação por irregularidade de superfície e a aeração como forma de prevenção*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1986. *Apud* KORMANN, 2002
9. BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Diretrizes para estudos de arranjos de obras de transposição de desnível para a navegação*. Manual do usuário. 2012b.
10. BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. *Estatísticas da Navegação Interior 2011*. 2012a.
11. BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. *Informativo Trimestral da Navegação Interior. 3º Trimestre de 2012*. 2013a.
12. BRASIL. Ministério dos Transportes. *Diretrizes da política nacional de transporte hidroviário*. 2010. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/04-hidro/7-snv-hidro/diret-pnth.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2013.

13. BRASIL. Ministério dos Transportes. *Banco de informações e mapas de transportes*. 2013b. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/04-hidro/barra-eclu.html>>. Acesso em: 01 de abr. de 2013.
14. CANHOLI, A. P. *Alguns aspectos dos esforços de amarração no projeto hidráulico de eclusas de navegação*. Dissertação de Mestrado USP. São Paulo: 1984.
15. CHOW, V.T. *Open-channel hydraulics*. International Student Edition. McGraw-Hill 21ed. Singapore: 1985.
16. CUOMO, A.R., PETRY, B., USSAMI, H. *Análise matemática de fenômenos transientes em eclusas de navegação – Tucuruí, um exemplo brasileiro*. IN: Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação. São Paulo: 1982.
17. DEY, S.; NATH, T.K.; BOSE, S.K. *Fully rough submerged plane wall-jets*. Journal of Hydro-environment, Research 4. 2010. p. 301-316.
18. EAD, S.A.; RAJARATNAM, N. *Plane turbulent wall jets in shallow tailwater*. Journal of Engineering Mechanics. Fevereiro, 2002. p. 143-155.
19. ERBISTE, P.C.F. *Comportas Hidráulicas*. Editora Campus/Eletróbrás, Rio de Janeiro: 1987.
20. ERIKSSON, J.G.; KARLSSON, R.I.; PERSSON, J. *An experimental study of a two-dimensional plane turbulent wall jet*. Experiments in fluids, 25. 1998. p. 50-60.
21. EZZELDIN, M.M.; NEGM, A.M.; ATTIA, M.I. *Experimental investigation on the hydraulic jump in sloping rectangular closed conduits*. Alexandria Engineering Journal. Setembro, 2000. v. 39. n° 5.
22. FALVEY, H.T., *Cavitation in chutes and spillways*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Engineering Monograph n° 42. EUA: 1990.
23. FLOW SCIENCE, Inc. *Flow-3D User's Manual*, Version 9.2, Los Alamos, New Mexico: 2005.
24. GARGANO, R.; HAGER, W.H. *Undular hydraulic jumps in circular conduits*. Journal of Hydraulic Engineering. Novembro, 2002.
25. GIKAS, I. *Crítérios de semelhança para estudos de cavitação em modelos*. Boletim técnico DAEE. São Paulo: 1982. v. 5. n° 2. p. 181-235.

26. GLERUM, A.; VRIJBURCHT, A. *Design of Locks 1*. Relatório. Delft: 2000. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/view/hydro/uuid%3Aafda7af7-ab32-4131-bf05-faa715fca55a/>>. Acesso em: 04 abr. 2012.
27. HAINDL, K., *Hydraulic Jump in Closed Conduit*. Proc., International Association of Hydraulic Research. Lisbon: 1957. v. 2.
28. HAINDL, K.; SOTORNÍK, V. *Quantity of air drawn into a conduit by the hydraulic jump and its measurement by gamma-radiation*. Proc., International Association of Hydraulic Research. Lisbon: 1957. v. 2.
29. HAMMACK, E. A.; STOCKSTILL, R.L. *3D numerical modeling of John Day lock valves*. IN: World Environmental and Water Resources Congress. 2009.
30. HAMMACK, E. A.; STOCKSTILL, R.L. *Computational flow model of a reverse tainter valve*. ERDC/CHL-IX-27. 2011. Disponível em: <<http://chl.erdc.usace.army.mil/library/publications/chetn/pdf/chetn-ix-27.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2012.
31. IDELCHIK, I.E., *Handbook of hydraulic resistance*. 3. ed. Nova York: Begell House, 1996.
32. KALINSKE, A.A.; ROBERTSON, J.M. *Closed conduit flow*. Re-impreso de ASCE Transactions 1943, v.108, em Classic Papers in Hydraulic, 1982.
33. KERMANI, M.Z.; KAVIANPOUR, M.-R. *Computer simulation for obtaining hydrodynamic forces on radial and leaf gates within a high pressure conduit*. Proceedings of the Congress International Association for Hydraulic Research, 2007. v. 2. p. 658.
34. KOLKMAN, P.A. *Analysis of vibration and damping measurements on a reversed tainter valve*. Publication nº 87. 1970. *Apud* USACE, 2011.
35. KORMANN, A.C.M. *Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens*. Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba: 2002.
36. LAUNDER, B.E.; RODI, W. *The turbulent wall jet, measurements and modeling*. Annual Review in Fluid Mechanics, 15. 1983. p. 429-459.
37. LIN, C.H.; YEN, J.F.; TSAI, C.T. *Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Julho/Agosto, 2002.

38. LOPARDO, R. A.; SOLARI, H. G. *Flutuaciones de presión en la base de resalto libre*. IN: IX Congresso Latino Americano de Hidráulica. IAHR. Mérida, Venezuela: 1980.
39. LOPARDO, R.A. *Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico*. Curso nº 1: Turbulencia, cavitación y aireación de fenómenos hidráulicos. São Paulo: 1986.
40. LOPARDO, R.A. *Presiones fluctuantes em dissipadores a resalto forzado*. IN: XV Congresso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR. Cartagena: 1992.
41. LOPARDO, R.A.; SAUMA HADDAD, J.C. *Valores extremos de presiones instantáneas inducidas por resalto libre y sumergido*. IN: XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Vol. 1, pg 13 a 24. Guayaquil, Ecuador: 1996.
42. LOPARDO, R.A. *Una aproximación al estudio de flujos macroturbulentos en resalto hidráulico*. Curso ministrado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre: 2005.
43. LUO, S.; HU, Y.; FAN, B.; SUN, F. *Study on flow-induced vibration of delivery valve of shiplocks*. IN: 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. 2008.
44. McCORQUODALE, J. *Hydraulic jumps and internal flows*. In: Cheremisinoff, N.P. (Ed.), Encyclopedia of Fluid Mechanics, vol. 2, pg 120 a 173. Gulf Publishing, Houston, 1986. *Apud* DEY et al., 2010.
45. MEES, A.A.A. *Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por resalto hidráulico com baixo número de Froude*. Dissertação de mestrado. IPH/UFRGS, Porto Alegre: 2008.
46. MEES, A.A.A. *Estudo dos esforços hidrodinâmicos em bacias de dissipação por resalto hidráulico*. Plano de dissertação. IPH/UFRGS, Porto Alegre: 2007.
47. MENÉNDEZ, A.N.; BADANOVA, N.D.; LECERTÚAA, E.A.; GERBEC, M.S.; REB, F.; REA, M. *CFD for hydraulic design of the Panama canal third set of locks*. IN: Argentinian Congress on Computational Mechanics - MECOM. 2010.

48. MURRAY, R.I.; SIMMONS, W.P., *Hydraulic downpull forces on large gates*. Bureau of Reclamation. Washington: 1967. *Apud* ROMAGNOLI, 2005
49. NARAYANAN, R. *Cavitation induced by turbulence in stilling basin*. Journal of Hydraulic Division, HY 4. Abril, 1980.
50. NAUDASCHER, E.; KOBUS, H.E.; RAO, R.P.R. *Hydrodynamic analysis for high-head leaf gates*. Journal of Hydraulic Division, HY 3. Maio, 1964.
51. NEILSON, F.M. *Barkley Lock prototype tests, Cumberland River, Kentucky*. Technical Report H-75-11. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg: 1975. *Apud* USACE, 2011.
52. NEVES, E.T., *Curso de hidráulica*. 9ed. São Paulo: Globo, 1989.
53. OLIVEIRA, D.T.; GOMES, P.M.L.; REIS, L.F.B. *Considerações sobre alguns resultados obtidos no modelos físico da eclusa 1 de Tucuruí*. IN: Simpósio Luso-Brasileiro sobre Simulação e Modelação Hidráulica. Blumenau: 1983.
54. OURIVES, W. *Curso sobre modelos hidráulicos reduzidos*. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH/EPUSP/DAEE. Belo Horizonte: 1989.
55. PALAURO, C. *Análise das pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida em eclusas de navegação*. Dissertação. IPH/UFRGS, Porto Alegre: 2012.
56. PALMIER, L.R. *Otimização das leis de manobra de comportas dos circuitos de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação*. Dissertação de mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro: 1990.
57. PERKINS, L.Z. *Navigation lock for Lower Granite DAM, Snake river, Washington: Hydraulic model investigation*. BHL TR No. 126-1. 1979. *Apud* USACE, 2006.
58. PETRY, B., PALMIER, L.R. *Contribuições para a otimização de leis de manobra de comportas de controle de vazão em aquedutos de eclusas de navegação*. Revista Latino Americana de Hidráulica. IAHR. Julho, 1992. nº 5.

59. PIANC, Permanent International Association of Navigation Congresses. *Innovations in navigation lock design*. Relatório nº 106. 2009.
60. PICKERING, G.A. *Lock culvert valve loss coefficient; Hydraulic model investigation*. WES TR HL-81-10. 1981. Apud HAMMACK & STOCKSTILL, 2009, e USACE, 2006.
61. PINTO, N.L.S. *Noções básicas sobre cavitação e aeração em fluxos de alta velocidade*. Revista Latino Americana de Hidráulica. IAHR. Maio, 1988. nº 3.
62. QINQIN, X. *Experimental research results for hydraulic design of high-lift lock culvert valves*. XXXI IAHR Congress. Seoul: 2005.
63. QUINTELA, A.C.; RAMOS, C.M. *Protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas*. LNEC. Lisboa: 1980.
64. RAJARATNAM, N. *Almanac of energy dissipation mechanisms*. In: VISCHER, D., HAGER, W.H. (ed), *Energy dissipators*. IAHR – Hydraulic Structures Design Manual 9. 1995.
65. RAJARATNAM, N. *Hydraulic jump in horizontal conduits*. Water Power. Fevereiro, 1965a.
66. RAJARATNAM, N. *Hydraulic jumps*. In: CHOW, V.T. (ed) *Advances in Hydrosience*. 1967. v. 4.
67. RAJARATNAM, N. *Turbulent jets*. Developments in water resources 5. Amsterdam: Elsevier, 1976.
68. RAJARATNAM, N. *The hydraulic jump as a wall jet*. Journal of Hydraulic Division 91 (5), Pg 107 a 132. 1965b. Apud DEY et al., 2010.
69. RESCH, F.J.; LEUTHEUSSER, H.J.; COANTIC, M. *Étude de la structure cinématique et dynamique du ressaut hydraulique*. Journal of Hydraulic Research. 1976. v. 14. nº 4.
70. ROMAGNOLI, M. *Avaliação experimental da vibração induzida sobre uma comporta plana com descarga de fundo*. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre: 2005.
71. ROMAGNOLI, M.; BASTOS, J.C.Q.; MARQUES, M.G.; ENDRES, L.A.M. *Fontes de excitação de vibrações em comportas hidráulicas*. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa: 2005.

72. SANTOS, S.R. *Efeito de escala no regime de escoamento em eclusas. Previsão do protótipo*. In: XIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Montevideo: 1990.
73. SANTOS, S.R. *Projeto hidráulico de eclusas de alta queda*. Tese de livre docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 1998. v. 1 e 2.
74. SHARMA, H.R. *Air-entrainment in high head gated conduits*. Journal of Hydraulic Division. Novembro, 1976.
75. SHENGYI, Z.; HUICHAO, D.; WENLI, W. *Effect study of valve hoisting way to the flow field for ship lock in the TGP*. In: XXXI IAHR Congress. Seoul: 2005.
76. SHINQIN, L.; YIHONG, W.; SHENZONG, X.; CHANGHE, L. *Hydrodynamic pressure of filling and emptying system and flow-induced vibration of reversed tainter gate of the lock at Wuqiangxi Hydroproject*. IN: XXVIII IAHR Congress. 1999.
77. SILVA, P.J. *Viabilidade de adoção de ascensores, como sistemas auxiliares, em obras de transposição*. In: 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro: 2012.
78. SMITH, C.D.; CHEN, W. *The hydraulic jump in a steeply sloping square conduit*. Journal of Hydraulic Research. 1989. v. 27. nº 3.
79. SOUZA, A.M. *Análise numérica da transição à turbulência em escoamentos de jatos circulares livres*. Tese. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: 2005.
80. STOCKSTILL, R.L. *Developing a lock operation strategy for pool lowering*. Water & Maritime Engineering. Setembro, 2002. v. 154. nº 3.
81. STOCKSTILL, R.L. *Hydraulic evaluation of a lock conduit experiencing structural failure*. Watershed System Conference. Estados Unidos da América: 2003.
82. TONDOWSKI, L. *Modelos reduzidos e efeitos de escala em eclusas de navegação*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 1987.

83. TRIERWEILER, E. F. N. *Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submersão*. Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre: 2006.
84. TULLIS, J.P. *Cavitação em sistemas hidráulicos*. Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos & Cavitação. São Paulo: 1982.
85. USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydraulic design criteria*. 1977.
86. USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydraulic design of lock culverts*. EM 1110-2-1610. 1975. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1610/entire.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2006.
87. USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydraulic design of navigation locks*. EM 1110-2-1604. 2006. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1604/entire.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2006.
88. USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Lock culvert valves; hydraulic design considerations*. ERDC/CHL TR-11-4. 2011. Disponível em: <http://www.usace-isc.org/presentation/HHC-Misc/Hydraulic_Design_of_Lock_Culvert_Valves_Stockstill_Richard.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2012.
89. USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Planning and design of navigation locks*. EM 1110-2-2602. 1995. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-2602/entire.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2006.
90. USSAMI, H. *Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação*. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 1980.
91. USSAMI, H.; CANHOLI, A.P.; CORADINI, L. *O emprego de modelo reduzido no projeto de eclusas de navegação*. Simpósio Luso-Brasileiro sobre Simulação e Modelação Hidráulica. Blumenau: 1983a.
92. USSAMI, H.; CORADINI, L.; CANHOLI, A.P. *Aplicações da modelagem matemática em sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas*. Simpósio Luso-Brasileiro sobre Simulação e Modelação Hidráulica. Blumenau: 1983b.
93. WEBB, J. *Innovations in lock emptying & filling systems*. 2009. Disponível em: <<http://www.pianc-aipcn.be/figuren/workshop%2015%2016%2010%202009/abstracts/P5a-%20HydraulicDesign%2027%20Sep%2009.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2013.

94. WU, S.; RAJARATNAM, N. *Free jumps, submerged jumps and wall jets*. Journal of Hydraulic Research. 1995. v. 33. n° 2.
95. ZHU, J. *Calcul des jets turbulents confinés avec recirculation*. Thèse. Institut National Polytechnique de Grenoble. Grenoble: 1986.

Sítios eletrônicos consultados:

1. <<http://www.industcards.com/jones-bluff.jpg>>. Acesso em: 22 ago. 2006.
2. <<http://www.ahimor.gov.br>>. Acesso em: 08 jun. 2007.
3. <<http://images.usace.army.mil/photolib.html>>. Acesso em: 05 set. 2006.
4. <<http://lhommebricole.free.fr/2004/ECLUSEKUNHEIM.htm>>. Acesso em: 03 jul. 2012.
5. <<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Locks-2.jpg>>. Acesso em: 25 ago. 2006.
6. <<http://images.usace.army.mil/photolib.html>>. Acesso em: 05 set. 2006.
7. <http://www.pianc.fi/AGA_technical_seminar/Rigo_WG29_Lock_innovations.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2013.
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Lock_water_transport>. Acesso em: 05 abr. 2013.

Apêndice

**APÊNDICE – ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO
FLOW-3D®**

Os arquivos lidos pelo *Flow-3D*® têm nome prepin.inp. Quando a simulação reinicia a partir de dados de outra simulação, o nome do arquivo deve ser prepinr.inp.

Como ler um arquivo prepin

Comando	Significado
remark=" " \$xput	Assinala um comentário, o qual é feito entre as aspas simples. Assinala o início da introdução dos parâmetros computacionais.
lfvis	Indicador de avaliação de viscosidade (modelo de turbulência) =0, avaliação da viscosidade local (sem modelo de turbulência) =1, Comprimento de Mistura de Prandtl =2, Modelo de energia turbulenta (turbulent energy model) =3, Modelo de duas equações (modelo de turbulência k-ε) =4, Renormalized Group Theory model (RNG) =-1, Modelo de simulações de grandes escalas (LES)
trest,	Tempo de cálculo para reinício (iniciar uma simulação a partir dos resultados de outra especificando o tempo)
twfin	Tempo de encerramento do cálculo
ifvisc	Indicador de viscosidade do escoamento =0, escoamento invíscido =1, Modelo de viscosidade Newtoniano =2, Modelo de viscosidade não-Newtoniano com coeficiente de viscosidade função de uma taxa de deformação (viscosity coefficient as function of strain rate) =3, Modelo de viscosidade não-Newtoniano com coeficiente de viscosidade função de uma taxa de deformação e temperatura
&bcdata	Condições de contorno dos blocos: 1, = plano de simetria 2, = parede rígida 3, = limite continuativo (continuative boundary) 4, = limites periódicos (periodic boundaries - must be applied at opposite sides of mesh) 5, = pressão especificada 6, = velocidade especificada 7, = valores obtidos de outros cálculos 8, = fluxo de saída que minimiza reflexão de ondas (outflow boundary that minimizes wave reflections) 9, = borda entre blocos
wb	Tipo de condição de contorno no valor mínimo de z da malha (Base)
wbk	Tipo de condição de contorno no valor máximo de y da malha (atrás)
wf	Tipo de condição de contorno no valor mínimo de y da malha (na frente)
wl	Tipo de condição de contorno no valor mínimo de x da malha (esquerda)
wr	Tipo de condição de contorno no valor máximo de x da malha (direita)
wt	Tipo de condição de contorno no valor máximo de z da malha (topo)

Comando	Significado
ubc(n)	Valor da velocidade em x no contorno da malha
/	Esta barra indica um domínio multiblocos.
&mesh	Assinala o início das informações dos blocos
NXCELT	Número total de células na direção x
NYCELT	Número total de células na direção y
NZCELT	Número total de células na direção z
PX(n)	Os pontos seguintes são pontos limite e de interesse dos blocos n-ésimo ponto em determinada posição na direção x da malha n-ésimo ponto em determinada posição na direção y da malha n-ésimo ponto em determinada posição na direção z da malha
PY(n)	
PZ(n)	
NXCELL(n)	Número de células entre PX(n) e PX(n+1)
NYCELL(n)	Número de células entre PY(n) e PY(n+1)
NZCELL(n)	Número de células entre PZ(n) e PZ(n+1)
	<p>EXEMPLO</p> <p>nzcelt=64, este bloco terá 64 células em z pz(1)=-0.02, pz(2)=0.0, pz(3)=0.26, este bloco vai de z=-0.02m até z=0.26m com um ponto de interesse no meio. nzcell(1)=2, coloca 2 células entre pz(1) e pz(2) e distribui as demais 62 células buscando não ter duas células vizinhas com tamanhos muito diferentes.</p>

Condição com abertura de 60% da comporta com vazão de 220 l/s

CASE OF A PIPE WITH A REVERSE TAINTER GATE

Turbulence model: K-e

It corresponds to a 2D modeling

```

$xput
  remark='units are MKS',
  itb=1,          remark='This is the tracking of the free surface',
  iwsh=1,        remark='This is the inclusion of wall shear stresses',
  ifvis=3,       remark='This is the turbulence closure k-e',
  ipdis=1,       remark='This is the initial hydrostatic pressure',
  igmres=1,      remark='This is the pressure iteration option - GMRES',
  gz=-9.7929,   remark='This is local acceleration due to the gravity',
  epsadj=1.0,
  dtmin=1e-10,  autot=2., remark='This is a numerical parameter',
  trest=112.0,  remark='This simulation started from simulation 50PREPIN',
  twfin=200.0,
  prttdt=500.0,
  pltdt=1.0,
  ifvisc=1,
$end
$limits
  irpr=1, jbkpr=1, ktp=1,
$end
$props
  rhof=998.2, remark='This is the density of water for 20C',

  mul=1.002e-3, remark='This is the dynamic viscosity',
$end

```

```

&bcddata      remark='boundary conditions of block1',
wl=6,         remark='This is a velocity boundary condition',
  ubc(1)=3.69, remark='This is the mean velocity of the flow',
  tkebc(1)=0.1239, remark='This is a turbulent energy at the left boundary(1)',
wr=9,         remark='This is an inter-block boundary condition',
/
&mesh        remark='block1 - upstream conduit',
  nxcelt=330,
  px(1)=-10.0, px(2)=-0.1, px(3)=-0.06,
  nyzelt=1,
  py(1)=0.0, py(2)=1.0,
  nzcelt=64,
  pz(1)=-0.02, pz(2)=0.0, pz(3)=0.02, pz(4)=0.23, pz(5)=0.25, pz(6)=0.26,
  nzcell(1)=2,
  nzcell(2)=8,
  nzcell(4)=8,
  nzcell(5)=2,
/
&bcddata      remark='boundary conditions of block2',
wb=9,         remark='This is an inter-block boundary condition',
/
&mesh        remark='block2 - upper gate recess',
  nxcelt=5,
  px(1)=0.145, px(2)=0.24, px(3)=0.255,
  nxcell(2)=1,
  nyzelt=1,
  py(1)=0.0, py(2)=1.0,
  nzcelt=180,
  pz(1)=0.76, pz(2)=0.8, pz(3)=8.0,
/
&bcddata      remark='boundary conditions of block3',
wl=9,         remark='This is an inter-block boundary condition',
wr=9,         remark='This is an inter-block boundary condition',
wt=9,         remark='This is an inter-block boundary condition',
/
&mesh        remark='block3 - gate recess',
  nxcelt=55,
  px(1)=-0.06, px(2)=0.01, px(3)=0.26, px(4)=0.4,
  nxcell(1)=14,
  nxcell(3)=28,
  nyzelt=1,
  py(1)=0.0, py(2)=1.0,
  nzcelt=105,
  pz(1)=-0.02, pz(2)=0.0, pz(3)=0.02, pz(4)=0.23, pz(5)=0.25, pz(6)=0.26,
  pz(7)=0.6, pz(8)=0.76,
  nzcell(1)=2,
  nzcell(2)=8,
  nzcell(3)=44,
  nzcell(4)=8,
  nzcell(5)=2,
  nzcell(6)=34,
/
&bcddata      remark='boundary conditions of block4',
wl=9,         remark='This is an inter-block boundary condition',
wr=5,         remark='This is a specified pressure boundary condition',
  flhtr=0.77, remark='This is the pressure at 37JB',
/
&mesh        remark='block4 - downstream conduit',
  nxcelt=390,
  px(1)=0.4, px(2)=0.8, px(3)=3.9,
  nxcell(1)=80,
  nyzelt=1,
  py(1)=0.0, py(2)=1.0,
  nzcelt=64,
  pz(1)=-0.02, pz(2)=0.0, pz(3)=0.02, pz(4)=0.23, pz(5)=0.25, pz(6)=0.26,
  nzcell(1)=2,
  nzcell(2)=8,

```

```

    nzcell(4)=8,
    nzcell(5)=2,
/

$obs
avrck=-2.1,
nobs=15,
iob(1)=1,          remark='This is the upstream ductile iron conduit - top',
xh(1)=-1.5, z1(1)=0.25,
rough(1)=4.69e-5,

iob(2)=2,          remark='This is the upstream ductile iron conduit - bottom',
xh(2)=-1.5, zh(2)=0.0,
rough(2)=4.69e-5,

iob(3)=3,          remark='This is the upstream fiberglass conduit - top',
xl(3)=-1.5, xh(3)=-0.15, z1(3)=0.25,
rough(3)=4.69e-5,

iob(4)=4,          remark='This is the upstream fiberglass conduit - bottom',
xl(4)=-1.5, xh(4)=-0.15, zh(4)=0.0,
rough(4)=4.69e-5,

iob(5)=5,          remark='This is the upstream plexiglass conduit - top',
xl(5)=-0.15, xh(5)=-0.05, z1(5)=0.25,
rough(5)=4.69e-5,

iob(6)=6,          remark='This is the plexiglass conduit - bottom - high
velocity zone',
xl(6)=-0.15, xh(6)=1.0, zh(6)=0.0,
rough(6)=8.53e-4,

iob(7)=7,          remark='This is the plexiglass chamfered edge',
xl(7)=-0.0515, xh(7)=0.0515, z1(7)=-0.0515, zh(7)=0.0515,
roty(7)=29.033, trnx(7)=-0.07, trnz(7)=0.32,
rough(7)=8.53e-4,

iob(8)=8,          remark='This is the axis of the gate',
rah(8)=0.01, rotx(8)=90.0, trnx(8)=0.0045, trnz(8)=0.29,
rough(8)=4.69e-3,

iob(9)=9,          remark='This is the gate',
ral(9)=0.3777, rah(9)=0.3877,
angll(9)=338.832, anglh(9)=37.754,
rotx(9)=90.0, trnx(9)=0.0045, trnz(9)=0.29,
rough(9)=4.69e-3,

iob(10)=10,        remark='Objects 10, 11 and 12 form the gate recess',
z1(10)=0.34, xh(10)=0.0,
rough(10)=8.53e-4,

iob(11)=11,
z1(11)=0.75, xh(11)=0.15,
rough(11)=8.53e-4,

iob(12)=12,
z1(12)=0.75, xl(12)=0.25, xh(12)=0.4,
rough(12)=8.53e-4,

iob(13)=13,        remark='This is the downstream plexiglass conduit - top -
recirculation zone',
xl(13)=0.3920, xh(13)=1.0, z1(13)=0.25,
rough(13)=1.45e-4,

iob(14)=14,        remark='This is the downstream plexiglass conduit - top',
xl(14)=1.0, z1(14)=0.25,
rough(14)=8.53e-4,

```

```
iob(15)=15,      remark='This is the downstream plexiglass conduit - bottom',  
xl(15)=1.0, zh(15)=0.0,  
rough(15)=8.53e-4,
```

```
$end
```

```
$f1  
nfls=2,  
fxh(1)=1.0, fzh(1)=1.962,  
fxl(2)=1.0, fzh(2)=0.77,  
ui=3.69,  
$end
```

```
$bf  
$end  
$temp  
$end  
$grafic  
$end  
$parts  
$end
```