

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida em Condutos de
Eclusas**

Fernanda Fernandes Martins de Oliveira

Pelotas, 2016

Fernanda Fernandes Martins de Oliveira

**Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida em Conduitos de
Eclusas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Dai Prá

Pelotas, 2016

Fernanda Fernandes Martins de Oliveira

Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida em Conduitos de
Eclusas

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá (Orientador)

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul

Prof^a. Dr^a Daniela Guzzon Sanagiotto

Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal
do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

Doutor em Engenharia Civil pela Université Laval

Dedico esta pesquisa a Deus, aos meus pais, as minhas irmãs, a meu marido Cristiam, e a meu orientador.

Agradecimentos

Esta página da dissertação é muito importante, pois é o momento de registrar a gratidão aos que acompanharam e fizeram parte desta conquista.

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que nos momentos difíceis me deu forças para perseverar.

Agradeço aos meus pais, Josué e Janice. Obrigada por me ensinarem a lutar com alegria e confiança pelos meus objetivos. Vocês são a minha base.

Ao Cristiam, meu querido esposo. Obrigada pelo amor e compreensão.

As minhas irmãs Josiane e Juliana. Obrigada pelo amor incondicional.

Às minhas avós. Obrigada, pois sempre pude contar com o amor e a confiança em relação as minhas escolhas.

À meu querido orientador Mauricio. Obrigada por apostar em mim, e me ajudar a construir esta pesquisa. Só cheguei até aqui, porque você esteve sempre presente, puxando as minhas orelhas ou transmitindo conhecimento e força. Este trabalho é nosso.

Ao grupo do Laboratório de Hidráulica da Engenharia Hídrica da UFPEL. Obrigada Aline, Daiane, João, Juca, Tuane, Priscila, Fernando, William e todos os demais bolsistas pela acolhida, apoio e convívio maravilhoso que estabelecemos principalmente no período de coleta de dados, saibam que sem ajuda de vocês não seria possível chegar até aqui.

Aos colegas de mestrado. Obrigada Gabriela, Mariana, Caroline, Guilherme e Bernardo, pelas inúmeras conversas, troca de conhecimento e amizade durante esta etapa de minha vida.

À Mariane Kempka, Samuel Beskow e Bernardo Norenberg pela ajuda com o software de tratamento dos gráficos.

À Paula Mascarenhas e Raul Marques, obrigada por flexibilizar meus horários de serviço, assim tornando possível a realização deste mestrado.

Aos professores do PPG em Recursos Hídricos. Obrigada a todos pelo conhecimento transmitido com comprometimento e alegria em dar aula, contribuindo para a minha formação dentro e fora de sala de aula.

E a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigada!

"E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria".

(Corintios I, 13:2)

Resumo

OLIVEIRA, Fernanda Fernandes Martins. **Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida em Condutos de Eclusas de Alta Queda**. 2016. 134f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

O Brasil apresenta uma riqueza hidrográfica notória, com uma malha navegável de aproximadamente 27.000km e ainda cerca de 8.500km de linha costeira. Porém muitas vezes nesta vasta malha navegável existem desníveis causados por ação antrópica ou originados pela própria geomorfologia da região, que impõem a necessidade de construção de eclusas de transposição de níveis. Foram lançadas metas das Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário para os próximos anos que preveem à construção de várias novas eclusas para fortalecer o sistema de transporte aquaviário brasileiro. Geralmente quanto menor o número de eclusas construídas para vencer um mesmo desnível maior a economia do projeto, porém isso acarreta em altas quedas, e por consequência cuidados maiores com os escoamentos mais turbulentos e com altas velocidades dentro dos aquedutos das eclusas. Logo esta pesquisa tem por objetivo analisar as pressões médias e extremas a que está submetido o aqueduto a jusante da comporta tipo segmento invertida em eclusas de navegação de alta queda, afim de conhecer as características do enchimento e do esvaziamento da câmara de transposição de nível e os esforços hidrodinâmicos que podem causar danos aos condutos. Para tanto foi implantado um modelo físico em laboratório com o objetivo de conhecer melhor as características hidráulicas e identificar padrões de comportamento que auxiliem na operação de eclusas e no aperfeiçoamento de projetos dessas estruturas. Através da análise dos dados ensaiados foi possível compreender o comportamento das pressões médias e extremas ao longo da base e do teto do conduto a partir da relação entre coeficientes adimensionais de posição e de pressão. Como comportamento característico na presente pesquisa, verificou-se que se forma próximo à comporta, para todos os graus de abertura exceto 100%, uma zona de recirculação do escoamento, com comprimento longitudinal variável, onde ocorrem às pressões mínimas, sendo que o teto recebe uma maior solicitação de pressões negativas, ou seja, de esforços de tração. Foi verificada a aplicabilidade do modelo experimental comparados com outros modelos citados nesta pesquisa, sendo que os resultados se apresentam mais coerentes para as pressões médias, do que para as pressões extremas mínimas. Logo pode se concluir que existe o risco de erosão logo a jusante da comporta, onde se concentram os esforços de tração de maior magnitude causados pelas pressões mínimas. E também que o modelo físico hidráulico na escala 1:32, provou sua validade, porém com desempenho inferior para as pressões extremas mínimas em relação aos resultados obtidos para as pressões médias.

Palavras-chave: eclusas de navegação, pressões médias e extremas, comportas tipo segmento invertida, modelos hidráulicos.

Abstract

Downstream pressure sluices Type Reversed Segment Conduits of High Fall Locks. 2016. 134f. Dissertation (Master of Water Resources) - Program of Graduate Studies in Water Resources, Technology Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2016.

Brazil has a remarkable river richness with a navigable network of approximately 27,000 km and about 8,500 km of coastline. However, often this vast waterway mesh gaps are caused by human action or originated by the geomorphology of the region, which imposes the need to build sluices. The goals were released by the Guidelines of National Policy for Waterway Transportation in the coming years to provide the construction of several new sluices to strengthen the Brazilian water transportation system. Generally, the lower the number of sluices built to win an unevenness more money is safe in the project, but it brings to high falls, and therefore greater care with the most turbulent flows and high speeds within the aqueducts of the sluices. Soon this research analyses the medium and extreme pressures to which it is subjected downstream aqueduct of the gate inverted type segment navigation sluices high fall, in order to know the filling characteristics and the emptying of the level of transposition chamber and the hydrodynamic forces, which can cause damage to pipelines. For that was implemented a physical model in the laboratory in order to better understand the hydraulic characteristics and identify behaviour patterns that assist in the operation of locks and improvement projects such structures. By analysing the tested data, it was possible to understand the behaviour of the mean and extreme pressures along the base and the conduit from the ceiling from the relationship between dimensionless coefficients position and pressure. As behaviour characteristic in the present study, there was formed next to gate for all degrees of opening other than 100%, a flow recirculation zone with the longitudinal variable length which occur at minimal pressure, and the ceiling receives a higher negative pressures request, i.e., tensile stresses. It was verified the applicability of the experimental model compared with other models cited in this research, and the results are presented more consistent to the average pressures, than to the minimum and extreme pressures. Soon this can be concluded that there is a risk of erosion, just downstream of the gate, which concentrate the greatest magnitude of tensile stresses caused by minimum pressures. In addition, that the hydraulic physical model in scale 1:32, proved its validity, but with lower performance for minimum extreme pressures in relation to the results obtained for the mean pressure.

Key words: navigation locks, medium and extreme pressure, inverted segment type gates, hydraulic models.

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição geográfica das 17 principais eclusas brasileiras.....	27
Figura 2 - Comparativo de modais com o comboio tipo da eclusa de Tucuruí.....	28
Figura 3 - Comparativo entre modais sobre desmatamento e emissão de poluentes.	28
Figura 4 – Funcionamento de uma eclusa.....	31
Figura 5- Elementos e partes de uma eclusa de navegação.....	33
Figura 6 - Comporta tipo segmento invertida em 3D (a) e seção transversal (b).....	34
Figura 7 - Linha de energia e piezométrica ao longo do fluxo próximo a uma comporta tipo segmento invertida.....	36
Figura 8 - Comportamento do coeficiente de perda de carga da comporta tipo segmento invertida.....	37
Figura 9 - Parâmetros hidráulicos e geométricos do escoamento.....	38
Figura 10 - Resultados de vários estudos já realizadas em comportas do tipo segmento invertidas a cerca do coeficiente de contração.....	38
Figura 11 - Efeitos de downpull (à esquerda) e uplift (a direita).....	40
Figura 12 - Erosão por cavitação no ponto de contração em aqueduto de um sistema de navegação.....	44
Figura 13 - Expansão do teto á jusante da comporta segmento invertida.....	46
Figura 14 - Expansão lateral do aqueduto á jusante da comporta tainter.....	47
Figura 15 - Rebaixamento cota de assentamento da comporta.....	48
Figura 16 - Pressões mínimas a jusante da comporta tipo segmento invertida.....	50
Figura 17a - Índices de pressões média e 17b - Índices de pressões mínimas 0,1%, 17c - Índices de pressões mínimas 1% e 17d - Índices de pressões médias e mínimas.....	52
Figura 18a – Linhas de ajuste de pressão média para a base e 18b para o teto do aqueduto.....	53
Figura 19 - Número de Reynolds das condições de ensaio de Battiiston (2013).....	55
Figura 20 – Sistema hidráulico e modelo experimental.....	59
Figura 21 - Reservatórios de montante e jusante - vista posterior.....	60

Figura 22 - Conjunto moto bomba de 10CV.....	60
Figura 23 – Modelo em fase de implantação.....	61
Figura 24 - Seção principal de ensaio: aqueduto e comporta segmento invertida... ..	62
Figura 25 - Detalhamento distâncias entre os pontos de coleta dos dados e a comporta, estando todas as cotas em cm.....	64
Figura 26 - A esquerda, o sistema de aquisição de dados e a direita os transdutores de pressão.....	65
Figura 27 – Imagens do medidor de vazão eletromagnético e do inversor de frequências.....	66
Figura 28 - Primeira bateria de ensaios: fase de instalação dos transdutores de pressão na base e piezômetros no teto.....	68
Figura 29 – Comporta tipo segmento invertida.....	69
Figura 30 – Carga de Pressão (cm.c.a.) versus Piezômetro instalado no base para abertura de 50%.....	70
Figura 31 - Nível d'água na chaminé de equilíbrio: No eixo X estão as vazões (L/s) e no eixo Y as pressões (cm.c.a).....	71
Figura 32 – Pressões médias na base (a=10%).....	73
Figura 33 – Pressões médias na base (a=20%).....	73
Figura 34 – Pressões médias na base (a=30%).....	73
Figura 35 – Pressões médias na base (a=40%).....	73
Figura 36 – Pressões médias na base (a=50%).....	74
Figura 37 – Pressões médias na base (a=60%).....	74
Figura 38 – Pressões médias na base (a=70%).....	74
Figura 39 – Pressões médias na base (a=80%).....	74
Figura 40 – Pressões médias na base (a=90%).....	75
Figura 41 – Pressões médias na base (a=100%).....	75
Figura 42 – Pressões médias no teto (a=10%).....	76
Figura 43 – Pressões médias no teto (a=20%).....	76
Figura 44 – Pressões médias no teto (a=30%).....	76

Figura 45 – Pressões médias no teto (a=40%).....	76
Figura 46 – Pressões médias no teto (a=50%).....	77
Figura 47 – Pressões médias no teto (a=60%).....	77
Figura 48 – Pressões médias no teto (a=70%).....	77
Figura 49 – Pressões médias no teto (a=80%).....	77
Figura 50 – Pressões médias no teto (a=90%).....	77
Figura 51 – Pressões médias no teto (a=100%).....	77
Figura 52 – Pressões médias na base (Q=3,9L/s).....	79
Figura 53 – Pressões médias no teto (Q=3,9L/s).....	79
Figura 54 – Pressões médias na base (Q=7,1L/s).....	79
Figura 55 – Pressões médias no teto (Q=7,1L/s).....	79
Figura 56 – Pressões médias na base (Q=14,1L/s).....	80
Figura 57 – Pressões médias no teto (Q=14,1L/s).....	80
Figura 58 – Pressões médias na base (Q=23,0L/s).....	80
Figura 59 – Pressões médias no teto (Q=23,0L/s).....	80
Figura 60 – Pressões médias na base (Q=31,8L/s).....	80
Figura 61 – Pressões médias no teto (Q=31,8L/s).....	80
Figura 62 – Pressões médias mínimas na base.....	81
Figura 63 – Pressões médias mínimas no teto.....	81
Figura 64 – Número de Reynolds para cada condição de ensaio.....	83
Figura 65 – CP_{adm} médio para a base (a=10%).....	84
Figura 66 – CP_{adm} médio para a base (a=20%).....	84
Figura 67 – CP_{adm} médio para a base (a=30%).....	84
Figura 68 – CP_{adm} médio para a base (a=40%).....	84
Figura 69 – CP_{adm} médio para a base (a=50%).....	84
Figura 70 – CP_{adm} médio para a base (a=60%).....	84
Figura 71 – CP_{adm} médio para a base (a=70%).....	85

Figura 72 – CP_{adm} médio para a base ($a=80\%$).....	85
Figura 73 – Comportamento longitudinal do CP_{adm} médio para a base do aqueduto.	86
Figura 74 – CP_{adm} médio para o teto ($a=10\%$).....	88
Figura 75 – CP_{adm} médio para o teto ($a=20\%$).....	88
Figura 76 – CP_{adm} médio para o teto ($a=30\%$).....	88
Figura 77 – CP_{adm} médio para o teto ($a=40\%$).....	88
Figura 78 – CP_{adm} médio para o teto ($a=50\%$).....	88
Figura 79 – CP_{adm} médio para o teto ($a=60\%$).....	88
Figura 80 – CP_{adm} médio para o teto ($a=70\%$).....	89
Figura 81 – CP_{adm} médio para o teto ($a=80\%$).....	89
Figura 82 – Comportamento longitudinal do CP_{adm} médio para o teto do aqueduto..	90
Figura 83 – CP_{adm} médio mínimo na base do conduto.....	92
Figura 84 – CP_{adm} médio mínimo no teto do conduto.....	92
Figura 85 – Pressão 1% na base ($a=10\%$).....	93
Figura 86 – Pressão 1% na base ($a=20\%$).....	93
Figura 87 – Pressão 1% na base ($a=30\%$).....	94
Figura 88 – Pressão 1% na base ($a=40\%$).....	94
Figura 89 – Pressão 1% na base ($a=50\%$).....	94
Figura 90 – Pressão 1% na base ($a=60\%$).....	94
Figura 91 – Pressão 1% na base ($a=70\%$).....	94
Figura 92 – Pressão 1% na base ($a=80\%$).....	94
Figura 93 – Pressão 1% no teto ($a=10\%$).....	95
Figura 94 – Pressão 1% no teto ($a=20\%$).....	95
Figura 95 – Pressão 1% no teto ($a=30\%$).....	96
Figura 96 – Pressão 1% no teto ($a=40\%$).....	96
Figura 97 – Pressão 1% no teto ($a=50\%$).....	96

Figura 98 – Pressão 1% no teto (a=60%).....	96
Figura 99 – Pressão 1% no teto (a=70%).....	96
Figura 100 – Pressão 1% no teto (a=80%).....	96
Figura 101 – Pressão 0,1% na base (a=30%).....	98
Figura 102 – Pressão 0,1% na base (a=40%).....	98
Figura 103 – Pressão 0,1% no teto (a=30%).....	98
Figura 104 – Pressão 0,1% no teto (a=40%).....	98
Figura 105 – CP _{adm1%} na base (a=10%).....	99
Figura 106 – CP _{adm1%} na base (a=20%).....	99
Figura 107 – CP _{adm1%} na base (a=30%).....	99
Figura 108 – CP _{adm1%} na base (a=40%).....	99
Figura 109 – CP _{adm1%} na base (a=50%).....	100
Figura 110 – CP _{adm1%} na base (a=60%).....	100
Figura 111 – CP _{adm1%} na base (a=70%).....	100
Figura 112 – CP _{adm1%} na base (a=80%).....	100
Figura 113 – Curvas de ajuste do CP _{adm1%} para a base do aqueduto.....	101
Figura 114 – CP _{adm1%} no teto (a=10%).....	103
Figura 115 – CP _{adm1%} no teto (a=20%).....	103
Figura 116 – CP _{adm1%} no teto (a=30%).....	103
Figura 117 – CP _{adm1%} no teto (a=40%).....	103
Figura 118 – CP _{adm1%} no teto (a=50%).....	103
Figura 119 – CP _{adm1%} no teto (a=60%).....	103
Figura 120 – CP _{adm1%} no teto (a=70%).....	104
Figura 121 – CP _{adm1%} no teto (a=80%).....	104
Figura 122 – Curvas de ajuste do CP _{adm1%} para o teto do aqueduto.....	105
Figura 123 – CP _{adm0,1%} para a base (a=30%).....	107
Figura 124 – CP _{adm0,1%} para a base (a=40%).....	107

Figura 125 – Curvas de ajuste do $CP_{adm0,1\%}$ para a base do aqueduto.....	107
Figura 126 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=30%).....	109
Figura 127 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=40%).....	109
Figura 128 – Curvas de ajuste do $CP_{adm0,1\%}$ para o teto do aqueduto.....	109
Figura 129 – Pressão média na base (a=100%).....	111
Figura 130 – Pressão média no teto (a=100%).....	111
Figura 131 – $P_{0,1\%}$ na base (a=100%).....	111
Figura 132 – $P_{0,1\%}$ no teto (a=100%).....	111
Figura 133 – $P_{1\%}$ na base (a=100%).....	111
Figura 134 – $P_{1\%}$ no teto (a=100%).....	111
Figura 135 – CP_{adm} médio na base (a=100%).....	113
Figura 136 – CP_{adm} médio no teto (a=100%).....	113
Figura 137 – $CP_{adm1\%}$ na base (a=100%).....	113
Figura 138 – $CP_{adm1\%}$ no teto (a=100%).....	113
Figura 139 – $CP_{adm0,1\%}$ na base (a=100%).....	114
Figura 140 – $CP_{adm0,1\%}$ no teto (a=100%).....	114
Figura 141 – Pressão 0,1% na base (a=10%).....	126
Figura 142 – Pressão 0,1% na base (a=20%).....	126
Figura 143 – Pressão 0,1% na base (a=30%).....	126
Figura 144 – Pressão 0,1% na base (a=40%).....	126
Figura 145 – Pressão 0,1% na base (a=50%).....	126
Figura 146 – Pressão 0,1% na base (a=60%).....	126
Figura 147 – Pressão 0,1% na base (a=70%).....	127
Figura 148 – Pressão 0,1% na base (a=80%).....	127
Figura 149 – Pressão 0,1% no teto (a=10%).....	129
Figura 150 – Pressão 0,1% no teto (a=20%).....	129
Figura 151 – Pressão 0,1% no teto (a=30%).....	129

Figura 152 – Pressão 0,1% no teto (a=40%).....	129
Figura 153 – Pressão 0,1% no teto (a=50%).....	129
Figura 154 – Pressão 0,1% no teto (a=60%).....	129
Figura 155 – Pressão 0,1% no teto (a=70%).....	130
Figura 156 – Pressão 0,1% no teto (a=80%).....	130
Figura 157 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=10%).....	131
Figura 158 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=20%).....	131
Figura 159 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=30%).....	131
Figura 160 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=40%).....	131
Figura 161 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=50%).....	131
Figura 162 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=60%).....	131
Figura 163 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=70%).....	132
Figura 164 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base (a=80%).....	132
Figura 165 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=10%).....	133
Figura 166 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=20%).....	133
Figura 167 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=30%).....	133
Figura 168 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=40%).....	133
Figura 169 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=50%).....	133
Figura 170 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=60%).....	133
Figura 171 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=70%).....	134
Figura 172 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto (a=80%).....	134

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Rede hidroviária brasileira.....	26
Tabela 2 - Principais parâmetros do modelo.....	58
Tabela 3 - Quantidades e faixas de operação dos transdutores de pressão, marca Zürich, modelo PSI-420.....	65
Tabela 4 - Condições de Ensaio.....	68
Tabela 5 - Comparação entre os CP_{adm} médios na base do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).....	87
Tabela 6 - Comparação entre os CP_{adm} médios no teto do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).....	91
Tabela 7 - Comparação entre os $CP_{adm1\%}$ na base do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).....	102
Tabela 8 - Comparação entre os $CP_{adm1\%}$ no teto do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).....	106
Tabela 9 - Comparação entre os $CP_{adm0,1\%}$ na base do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).....	108
Tabela 10 - Comparação entre os $CP_{adm0,1\%}$ no teto do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).....	110

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CEGN	Centro de Estudos em Gestão Naval
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DRDH	Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
IPH/UFRGS	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
MMA	Ministério do Meio Ambiente
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
URI	Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Lista de Símbolos

a, b	grau de abertura da comporta
B	dimensão de largura do aqueduto
c	celeridade da onda de pressão
C_c	coeficiente de contração
D	altura do conduto
e	espessura do conduto
E	módulo de elasticidade do material do conduto
g	aceleração da gravidade
k	coeficiente de perda de carga singular
K	parâmetro adimensional de cavitação
k_2	módulo de elasticidade da água
P	pressão no ponto considerado
\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
P_a	pressão atmosférica
P_v	pressão relativa média a jusante da comporta
P_{vap}	pressão de vapor na temperatura ambiente
P_{vena}	pressão na "venacontracta"
P_{vg}	pressão relativa de vapor da água
P_u	pressão relativa a montante da comporta
Q	vazão
V	velocidade média do escoamento
V_a	velocidade média na seção da comporta
V_v	velocidade média do jato na "venacontracta"
Y_r	altura do escoamento na seção contraída a jusante da comporta
Δh	perda de carga singular
σ	índice de cavitação
γ	peso específico da água
ρ	massa específica da água

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	OBJETIVO.....	23
2.1	Objetivo Geral.....	23
2.2	Objetivos Específicos.....	23
2.3	Hipóteses.....	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1	Sistema Hidroviário Nacional.....	25
3.2	Eclusas de Navegação.....	29
3.2.1	Classificação das eclusas.....	29
3.2.2	Tipos de eclusas.....	29
3.2.3	Funcionamento das eclusas de alta queda.....	30
3.2.4	Componentes das eclusas de navegação.....	31
3.3	Fenômenos Hidráulicos a Jusante das Comportas Tipo Segmento Invertidas.....	32
3.3.1	Perda de carga.....	35
3.3.2	Vena contracta.....	37
3.4	Patologias em Eclusas.....	39
3.4.1	Esforços hidrodinâmicos e vibrações em comportas.....	39
3.4.2	Erosão no concreto em condutos de eclusas.....	41
3.5	Soluções Contra a Erosão do Concreto.....	45
3.6	Estudos em Modelos Físicos para Caracterização do Escoamento a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertidas.....	48
4	METODOLOGIA.....	57
4.1	A Implantação e as Características do Modelo Experimental.....	57
	Sistema de armazenamento e bombeamento.....	58
4.2	O trecho de circulação.....	61
4.3	O trecho de simulação.....	61
4.4	Instrumentação e Métodos de Medição.....	63
4.4.1	Medições de pressão.....	63
4.5	Sistema de controle de vazões.....	65
4.6	Execução dos Ensaios e Coleta de Dados.....	66
4.7	Etapa de Análise dos Dados.....	69
	Consistência dos dados.....	69
	Análise e tratamento dos dados.....	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
5.1	Pressões Médias Junto à Base e ao Teto do Conduto.....	72
5.1.1	Pressões médias junto à base do aqueduto.....	72
5.1.2	Pressões médias junto ao teto do aqueduto.....	76

5.1.3	Pressão média: comparação base e teto para vazões iguais e aberturas diferentes.....	79
5.1.4	Pressões médias mínimas na base e no teto.....	81
5.2	Coeficientes de Pressão Média Junto à Base e ao Teto do Aqueduto.....	82
5.2.1	Coeficiente de pressão média junto à base do aqueduto.....	83
5.2.2	Coeficiente de pressão média junto ao teto do conduto.....	87
5.2.3	Coeficiente de pressão média adimensional mínimo na base e no teto.....	91
5.3	Comportamento das Pressões Mínimas P1% e P0,1%.....	93
5.3.1	Pressões com 1% de probabilidade de não excedência ($P_{1\%}$).....	93
5.3.2	Pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência ($P_{0,1\%}$).....	97
5.3.3	Comportamento dos coeficientes de pressões adimensionais mínimos ($CP_{adm1\%}$ e $CP_{adm0,1\%}$).....	98
5.4	Comportamento dos Coeficientes Adimensionais Médios para a Abertura de 100% da Comporta..	110
6	CONCLUSÕES.....	115
6.1	Comportamento hidrodinâmico das pressões médias junto ao teto e a base do aqueduto.....	115
6.2	Comportamento das pressões extremas junto ao teto e a base do aqueduto.....	117
6.3	Comportamento das pressões na abertura de 100% junto a base e ao teto do aqueduto.....	119
7	RECOMENDAÇÕES.....	120
ANEXO A - DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 0,1% PARA A BASE DO CONDUTO 126		
ANEXO B - DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 0,1% PARA O TETO DO CONDUTO 129		
ANEXO C - DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 0,1% PARA A BASE DO CONDUTO..... 131		
ANEXO D - DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 0,1% PARA O TETO DO CONDUTO..... 133		

1 Introdução

O sistema hidroviário é mundialmente utilizado para o transporte de grandes volumes a longas distâncias, por ser economicamente mais vantajoso em relação aos sistemas ferroviário e rodoviário. Além de ser ecologicamente mais recomendado, pois conta com menor taxa de emissões de gases para a atmosfera em relação aos outros sistemas de transporte.

O transporte aquaviário está em crescente desenvolvimento em nosso país, pois o Brasil é o dono de uma das maiores malhas fluviais do mundo. Porém esta riqueza hídrica não é utilizada apenas para navegação: o Brasil gera a maior parte da sua energia através de usinas hidrelétricas que, na maioria das vezes, impõem barramentos para o estabelecimento de quedas d'água. Estes barramentos acabam impedindo a passagem das embarcações, causando desníveis a serem vencidos. Além destes desníveis causados pela ação antrópica ainda existem os desníveis naturais originados pela geomorfologia de cada região.

Para vencer estes desníveis, que podem inviabilizar a navegação em trechos de uma malha hidroviária, utilizam-se estruturas hidráulicas denominadas eclusas de navegação. Estas estruturas, que podem ser de baixa, média e alta queda, têm a função de elevar ou rebaixar em segurança as embarcações até o nível navegável. Quanto maior a queda, ou seja, o desnível entre montante e jusante, maiores os riscos de erosão nos condutos a jusante das comportas de enchimento e esvaziamento. Pois no acionamento de abertura destas comportas a água entra na tubulação com velocidades muito elevadas e logo a jusante da comporta é provocada, pelo movimento da água, uma área de instabilidades, onde na maior parte do tempo junto ao teto do conduto ocorrem pressões negativas e junto à base pressões positivas. De acordo com a magnitude destas pressões, podem ser desencadeados processos de cavitação que por sua vez pode resultar em erosão, com potencial de remover o material das paredes do conduto, desestabilizando o mesmo estruturalmente.

A fim de reduzir as velocidades no interior da câmara durante o enchimento e/ou esvaziamento das eclusas de alta queda, este processo se dá pelo fundo, através de um sistema complexo de tubulações normalmente de seção retangular distribuídas junto ao fundo da câmara, orientadas de forma a causarem perda de

carga suficiente e distribuir a vazão uniformemente, a fim de que o escoamento chegue aos orifícios (manifolds) de saída no fundo, sem o poder de causar perturbações na superfície que sejam capazes de movimentar as embarcações. As perturbações da superfície livre da água no interior da câmara podem levar a embarcação a se chocar com as paredes da eclusa, colocando em risco a tripulação e causando danos materiais à embarcação e à própria estrutura da eclusa.

Portanto, para garantir um sistema hidrodinamicamente balanceado que permita encher e esvaziar as câmaras das eclusas o mais rápido possível minimizando os riscos de erosão e sem perturbações na superfície é necessário o prévio estudo em modelos hidráulicos a fim de verificar as pressões a jusante das comportas das eclusas, otimizando assim seu funcionamento, ampliando sua vida útil e garantindo a segurança da estrutura hidráulica.

Esta pesquisa está inserida no projeto intitulado: Análise dos Esforços Hidrodinâmicos a Jusante de Válvulas de Sistemas de Enchimento/Esvaziamento de Eclusas de Navegação, financiado pelo CT-Aquaviário através da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) que foi desenvolvido em rede entre a UFPel, o IPH/UFRGS, a UNISINOS e a URI/Erechim.

Neste capítulo foi apresentada uma breve introdução acerca do setor hidroviário e das eclusas de navegação, onde tem-se a aplicação deste estudo. No capítulo 2 a seguir encontram-se o objetivo geral e os objetivos específicos, além das hipóteses esperadas para a presente pesquisa. No capítulo 3 é apresentada revisão bibliográfica, onde são mostrados os estudos e conceitos que nortearam este estudo. Logo após, no capítulo 4, encontra-se o detalhamento dos equipamentos e procedimentos adotados para a obtenção e tratamento dos dados. No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos. Por fim no capítulo 6 são analisados de forma comparativa com as outras pesquisas base e comentados os resultados encontrados.

2 Objetivo

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar as pressões médias e mínimas em aquedutos de eclusas de navegação, para diversas condições de operação da comporta tipo segmento invertida, a fim de identificar situações críticas de projeto e operação, a partir de estudos hidráulicos em um modelo físico experimental.

2.2 Objetivos Específicos

Através da simulação física em laboratório do funcionamento hidráulico de um aqueduto de enchimento/esvaziamento controlado por uma comporta tipo segmento invertida utilizada em aquedutos de eclusas de alta queda, e mediante distintas condições hidráulicas impostas no modelo físico, tem-se como objetivos específicos:

- a) implementar e instrumentar um modelo físico hidráulico representativo do escoamento a jusante de comportas tipo segmento invertida;
- b) coletar dados de pressões a jusante da comporta, incluindo valores médios e mínimos;
- c) analisar o comportamento da distribuição longitudinal das pressões a jusante da comporta, tanto na base quanto no teto do conduto;
- d) identificar as regiões onde ocorrem as pressões mínimas, bem como identificar zonas de recirculação do escoamento.

2.3 Hipóteses

As hipóteses avaliadas nesta pesquisa são:

- a) existe uma relação direta entre os graus de abertura da comporta e a magnitude dos esforços hidráulicos verificados na base e no teto do aqueduto;
- b) é possível estimar critérios de projetos hidráulicos que visem prever a ocorrência de processos erosivos do concreto das paredes do aqueduto a jusante da comporta a partir de parâmetros adimensionais.
- c) os resultados obtidos por Kempka (2014) e Battiston (2013) podem ter sua validade expandida para estudos em modelos físicos em escala superior àquela prevista pelos autores.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Sistema Hidroviário Nacional

O Brasil é um país privilegiado por sua vasta hidrografia, porém isto de nada adianta sem uma boa gestão destes recursos. Já há algum tempo, o poder público percebeu que não existe crescimento econômico a longo prazo sem uma boa gestão dos recursos hídricos do país, e desde então medidas vem sendo implantadas a fim de garantir os múltiplos usos dos recursos hídricos no Brasil, como a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433 de 08/01/1997.

Ainda a lei 13.081 de 2 de Janeiro de 2015, sanciona em seu artigo 1º que para a construção de barragem para geração de energia elétrica em vias navegáveis ou potencialmente navegáveis deverá ocorrer de forma concomitante a construção de eclusas de navegação ou dispositivo para transposição de nível.

Dessa forma, a Agência Nacional de Águas (ANA) tem exigido dos empreendedores, como condicionante nas Resoluções de Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica (RDRDH) e de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos, a apresentação de soluções de engenharia de dispositivos de transposição de desnível em cursos d'água navegáveis ou potencialmente navegáveis em que se instalarão empreendimentos hidrelétricos. Ações como esta mostram que têm sido dada uma atenção maior ao modal hidroviário, que pode ser notada através do Plano de Outorga que prevê um investimento para a instalação de 27 novas eclusas até 2018, além da previsão de um total de 62 eclusas até 2026 (ANTAQ, 2012).

Alfredini e Arasaki (2009) afirmam que os usos dos recursos hídricos mais comuns no Brasil, são: o abastecimento de água, irrigação, hidrelétricas e hidrovias. Sabendo que as hidrelétricas geralmente exigem um barramento a fim de elevar o nível de água para viabilizar a geração de energia, este barramento, apesar de regularizar a vazão do rio e ampliar a área navegável, acaba impedindo a passagem das embarcações e causando desníveis a serem vencidos entre montante e jusante. Para vencer estes desníveis utilizam-se estruturas hidráulicas denominadas eclusas de navegação.

Em países desenvolvidos onde o transporte aquaviário de carga é amplamente utilizado existem muitas eclusas em operação como, por exemplo, a Holanda, que possui 96 eclusas em uma área territorial de 41.526km² (ANTAC, 2010). No Brasil operam 20 eclusas em uma área territorial de 8.514.876,59km², o que somente evidencia o longo caminho a percorrer na expansão da navegação interior no Brasil. A Figura 1 mostra a distribuição das 17 eclusas consideradas por CEGN (2013) como principais, dentro do território brasileiro.

Segundo ANTAQ (2010), o Brasil possui uma malha interna navegável de aproximadamente 27.000km de hidrovias e com potencial de ampliação desta malha de aproximadamente mais 15.000km (Tabela 1), além de contar com uma linha costeira de aproximadamente 8.500km.

Tabela 1 - Rede hidroviária brasileira

Bacia	Estado	Extensão aproximada (km)		
		Navegável	Potencial	Subtotal
Amazônica	AM,PA,AC,RO,RR e AP	18.300	723	19.023
Nordeste	MA e PI	1.740	2.975	4.715
Tocantis/Araguaia	TO,MA e GO	2.200	1.300	3.500
São Francisco	MG,BA,PE e SE	1.400	2.700	4.100
Leste	MG, ES e RJ	-	1.094	1.094
Paraná	SP, PR e SC	1.900	2.900	4.800
Paraguai	MT, MS e PR	1.280	1.815	3.095
Sudeste	RS	600	700	1.300
Uruguai	RS e SC	-	1.200	1.200
TOTAL		27.420	15.407	42.827

Fonte: Adaptado de ANA, 2012.

O modal aquaviário apresenta vantagens econômicas, ambientais e de segurança sobre os demais, pois o gasto com combustível é o menor existente entre os modais. A Figura 2 mostra um comparativo entre diferentes modais e a distância percorrida por litro de combustível. Além disso, trata-se de uma solução de transporte com menor impacto ao meio ambiente, além de reduzir os acidentes e mortes nas rodovias com a diminuição do transporte de carga pelo modal rodoviário. Segundo dados de DAER (2013), aproximadamente 50% dos acidentes que ocorrem no sul do país se dão com caminhões de carga.

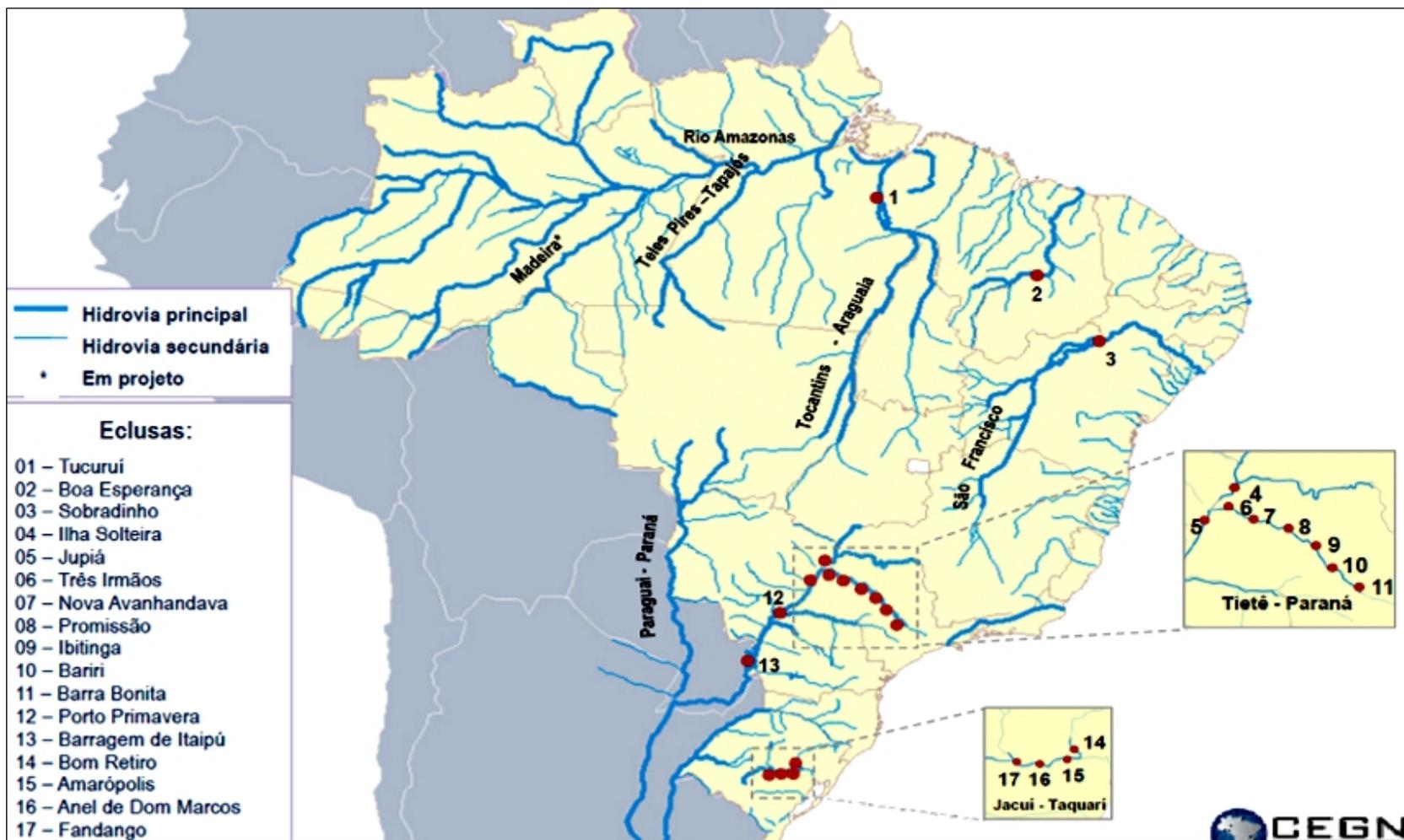


Figura 1 - Distribuição geográfica das 17 principais eclusas brasileiras.

Fonte: CEGN, 2013.

Em relação aos aspectos ambientais, o transporte hidroviário reduz significativamente as emissões de gases poluentes causadores do efeito estufa por carga transportada, além de não impor desmatamento para a sua implantação, como ocorre com os modais ferroviário e rodoviário, conforme mostra a Figura 3. Segundo o MMA (2008) o modal hidroviário possui eficiência energética (relação carga/potência) 29 vezes superior ao modal rodoviário.

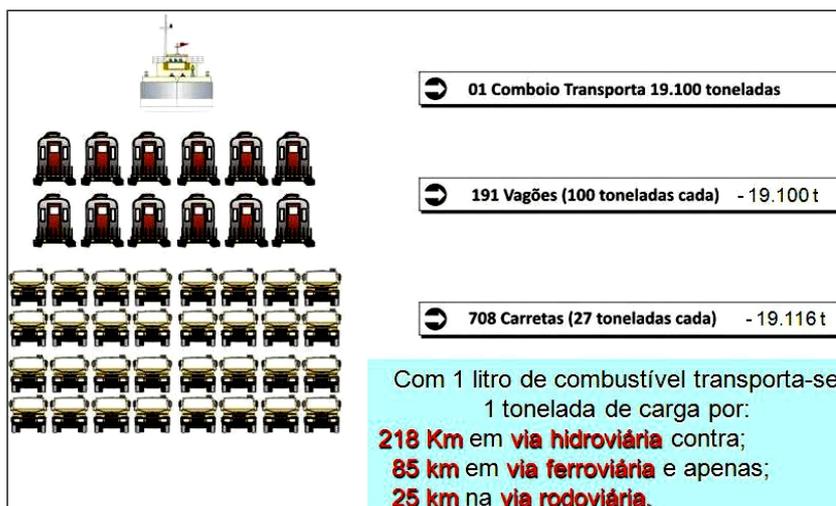


Figura 2 - Comparativo de modais com o comboio tipo da eclusa de Tucuruí.

Fonte: Cidade de Tucuruí, 2013.

Desmatamento para implantação			
	Extensão (km)	Área desmatada (m ²)	Investimento (milhões US\$)
Hidrovia	2.202,0	0	115,7
Ferrovia	2.010,0	77.100.000	1.827,0
Rodovia	2.500,0	100.000.000	625,0

Fonte: Dergo, Valec, Ahitar/MT

Emissão de poluentes por modal			
	Hidroviário	Ferrovário	Rodoviário
CO	0,018	0,150	0,250
CO ₂	40	48	140
NOX	0,5	0,4	3,0
HC	0,08	0,07	0,32
SO ₂	0,05	0,18	0,18

Fonte: N.C.B.G.Schneider, "Hidroviarias Interiores: Um Modal Econômica e Ambientalmente Viável?";

Figura 3 - Comparativo entre modais sobre desmatamento e emissão de poluentes.

Fonte: MMA, 2008.

3.2 Eclusas de Navegação

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 d'água e istmos) ou de ação antrópica (barramentos), pelas embarcações (BATTISTON, 2013). Para tanto, estes equipamentos são dotados de uma câmara conectada a aquedutos que propiciam seu enchimento e esvaziamento até atingir o nível desejado, onde existem duas portas ou cabeças, uma de montante e outra de jusante, que isolam o nível a ser transposto e viabilizam o acesso das embarcações para o nível desejado. O seu funcionamento se dá através do princípio de vasos comunicantes, não sendo necessários sistemas de bombeamento.

3.2.1 Classificação das eclusas

As eclusas são classificadas quanto à altura de queda que é definida pela diferença de nível d'água entre montante e jusante de sua câmara. São classificadas como de baixa queda quando possui desnível de até 10 metros, média queda quando o desnível permanece entre 10 e 15 metros, e alta queda quando o desnível é superior a 15 metros (USACE, 1995; PLEC, 2010; KEMPKA 2011; BATTISTON, 2013; KEMPKA, 2014). A queda de uma eclusa define a complexidade do projeto e operação da mesma, pois quanto maior o desnível entre montante e jusante, maiores os cuidados a serem tomados quanto à hidrodinâmica e à estrutura civil.

3.2.2 Tipos de eclusas

Segundo ANA (2012) os sistemas hidráulicos, de eclusas de navegação, podem ser do tipo: (i) **câmara única** (eclusas simples), utilizadas atualmente para desníveis até pouco mais de 40 m; (ii) **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; (iii) **escadas de eclusas**, formadas por uma série de câmaras simples ligadas por canais de navegação intermediários; (iv) **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.

Pode-se classificar as eclusas, também, quanto ao tipo de enchimento e esvaziamento. Quando ele ocorre pelas portas de montante ou jusante, é chamado de sistema simplificado, sendo utilizado para desníveis pequenos, normalmente até 4,5m de desnível. Também existem processos de enchimento e esvaziamento pela lateral da câmara, usual em eclusas de média queda, com desníveis de até 12m, onde aquedutos laterais injetam água na câmara através de orifícios nas paredes longitudinais. Para eclusas de alta queda é comum o enchimento e esvaziamento pelo fundo, através de um sistema complexo de aquedutos sob a câmara, conforme descrito no próximo item deste capítulo.

3.2.3 Funcionamento das eclusas de alta queda

O enchimento e esvaziamento de eclusas de alta queda se dá pelo fundo, através de um complexo sistema de tubulações, normalmente retangulares, e com muitas curvas projetadas para causarem perda de carga suficiente a fim de que o escoamento chegue aos orifícios de saída (manifolds) no fundo sem o poder de causar perturbações na superfície que sejam capazes de movimentar as embarcações (ALFREDINI E ARASAKI, 2009). Estas perturbações podem levar a embarcação a se chocar com as paredes da eclusa, colocando em risco a tripulação e causando danos materiais a embarcação e a própria estrutura da eclusa. A figura 4 mostra de forma simplificada o processo de transposição de nível.

Para que este tipo de acidente não ocorra, as comporta do sistema de enchimento e esvaziamento, que controla as vazões, devem ser cuidadosamente operadas. No acionamento da abertura desta comporta a água entra na tubulação com velocidades muito altas e logo a jusante é provocada uma área de recirculação, onde se forma uma zona de instabilidade de pressões, sendo que o teto do conduto recebe pressões negativas com maiores magnitudes do que a base, e a base do conduto, por sua vez, recebe pressões positivas de maiores magnitudes. Assim podendo provocar o fenômeno de cavitação e até mesmo desencadear processos de erosão, com potencial de arrancar o material das paredes do conduto, de acordo com a intensidade das pressões atuantes (BATTISTON, 2013).

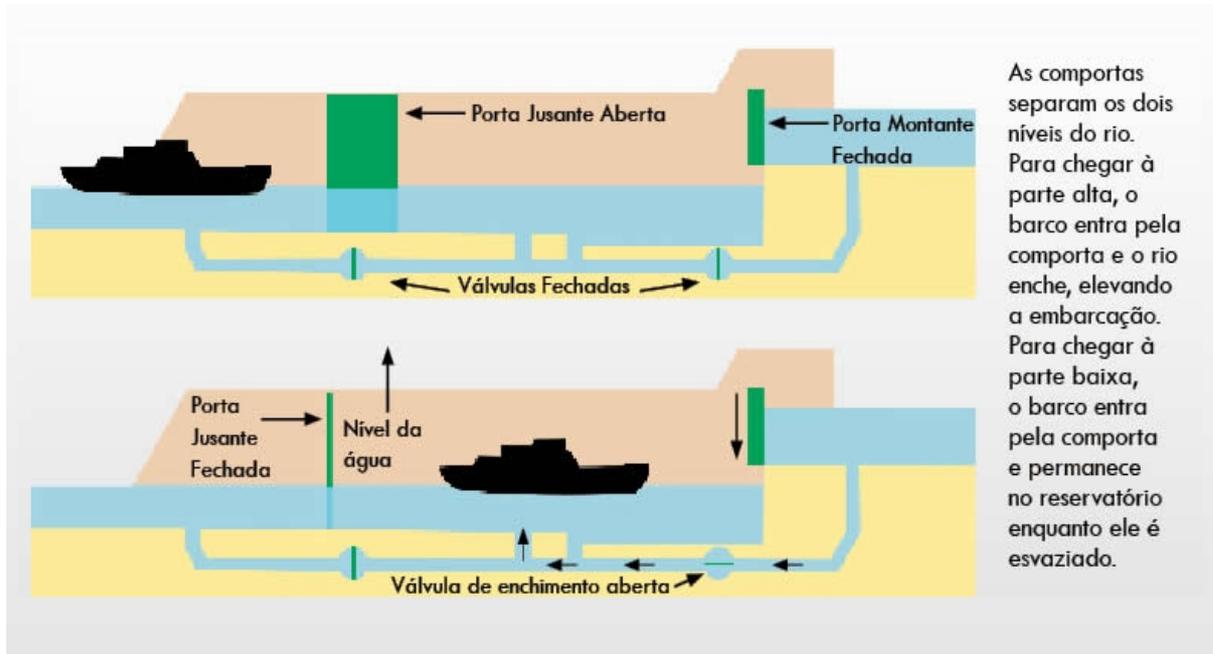


Figura 4 – Funcionamento de uma eclusa

Fonte: Universidade Federal do Pará, 2016.

Para garantir um sistema hidrodinamicamente balanceado que permita encher e esvaziar as câmaras das eclusas o mais rápido possível sem perturbações na superfície é necessário o prévio estudo em modelos reduzidos a fim de verificar as pressões a jusante das comportas das eclusas, otimizando, assim, seu funcionamento, ampliando sua vida útil e garantindo a segurança (KEMPKA, 2011).

3.2.4 Componentes das eclusas de navegação

Os principais componentes do sistema de eclusagem, segundo Alfredini e Arasaki (2009) são:

- a) muros guias - na entrada e na saída da câmara, lateralmente existem muros ala ou guias que encaminham as embarcações até a eclusa, e servem como garagens de barcos ou anteportos;
- b) portas de montante ou de jusante - são as portas da câmara da eclusa, por onde ocorre o ingresso e saída das embarcações na câmara;

- c) stop-logs - são painéis de vedação tipo comportas escadeiras, para realização de manutenção, ou quando for necessário o esgotamento total da câmara;
- d) manifolds ou difusores - são os orifícios ao final dos aquedutos existentes no interior da câmara, por onde a água ingressa na câmara;
- e) câmara - compartimento onde as embarcações permanecem até a transposição de nível;
- f) aqueduto principal - são condutos forçados, geralmente de seção transversal quadrada, onde se encontram as válvulas controladoras do enchimento e esvaziamento da câmara;
- g) válvulas de controle - são responsáveis pelo controle do enchimento e do esvaziamento da câmara, sendo dispositivos mecânicos acionados por uma fonte de energia elétrica.

Na Erro: Origem da referência não encontrada, estão apresentados alguns componentes de uma eclusa de navegação de alta queda, exceto a válvula de controle e os stop-logs, pois estes se encontram no interior do aqueduto principal.

3.3 Fenômenos Hidráulicos a Jusante das Comportas Tipo Segmento Invertidas

Diversos tipos de comportas ou válvulas de controle foram utilizadas em eclusas de navegação, porém atualmente a comporta tipo segmento invertida (Figura 6), vem sendo amplamente utilizada e apresentando bom desempenho técnico e econômico.

Segundo Alfredini e Arasaki (2009) nas eclusas de alta queda, as questões hidráulicas usualmente mais relevantes a modelar na otimização das operações de eclusagem são: vórtices junto às tomadas d'água, perdas de carga, cavitação nos aquedutos e agitação no interior da câmara por induzirem esforços nas amarras. As pressões ao longo dos aquedutos de enchimento e esvaziamento da câmara, definem as leis de manobra para operação da eclusa, objetivando condições operacionais de comportamento hidráulico tecnicamente satisfatório e economicamente viável, visando principalmente o controle da cavitação.

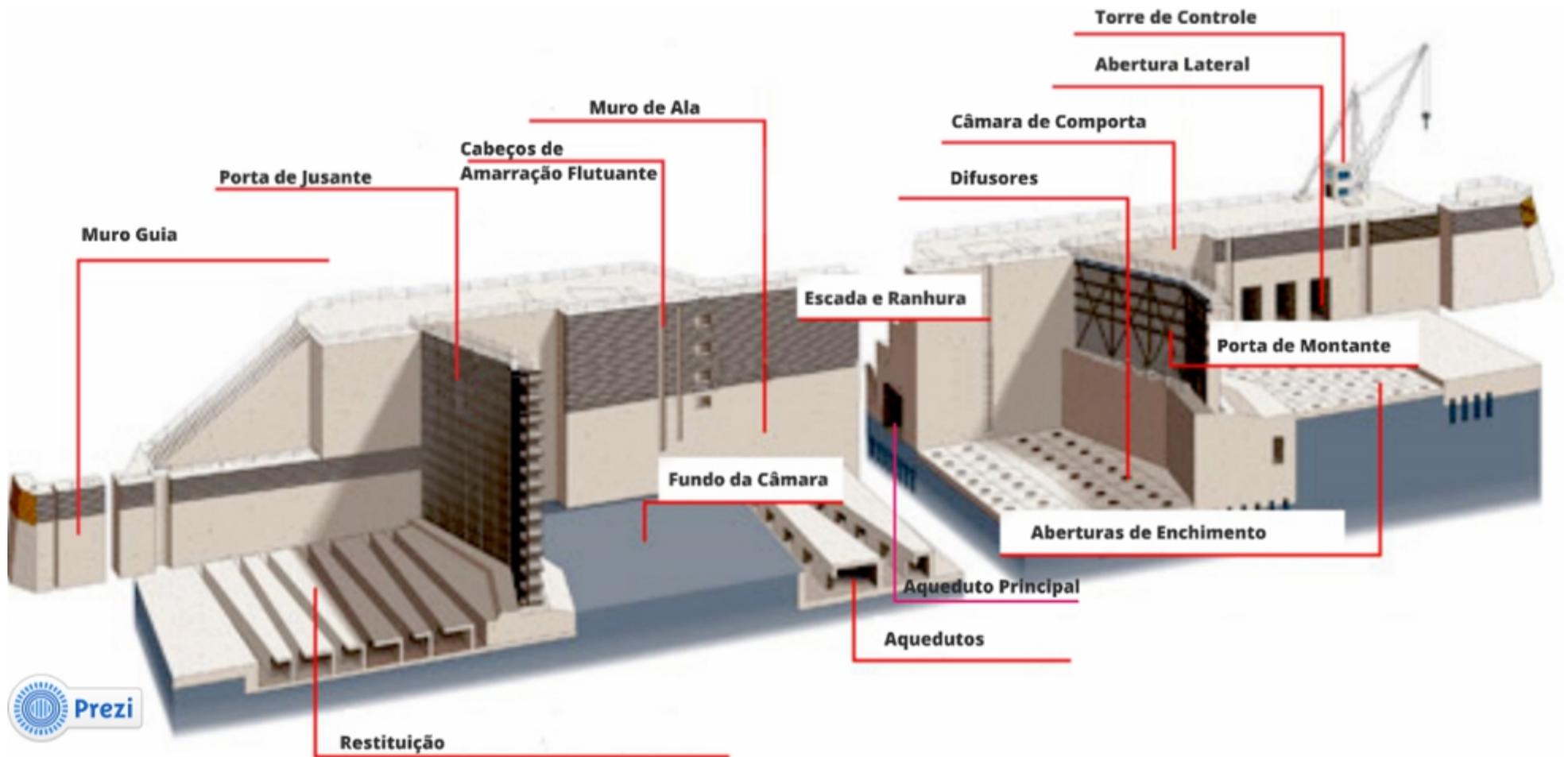


Figura 5- Elementos e partes de uma eclusa de navegação.

Fonte: NOBORU, 2013.

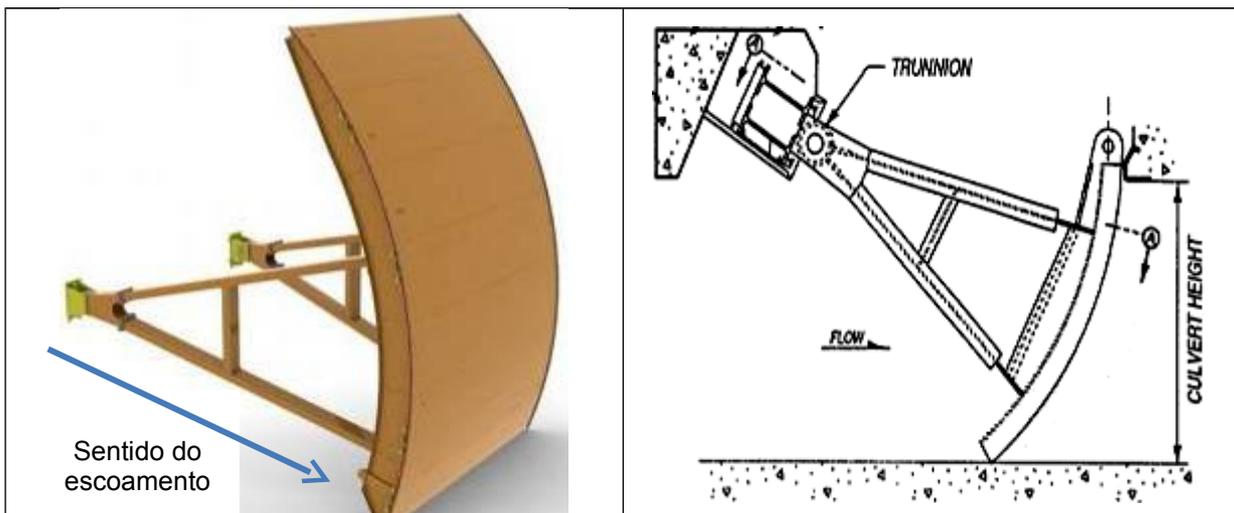


Figura 6 - Comporta tipo segmento invertida em 3D (a) e seção transversal (b).

Fonte: (a) adaptado DEMUTH ENERGY, 2014 e (b) adaptado de USACE, 2006.

Antigamente algumas comportas tipo segmento foram projetadas e até mesmo construídas com sua face contra o fluxo. No entanto, foi verificado que a instalação desta forma apresentava um grave problema, pois ocorria à entrada de ar pelo poço da válvula ou chaminé de equilíbrio na fase acelerada do movimento do fluxo, sendo este ar expulso para dentro da câmara, ocasionando oscilações na superfície da água. No esvaziamento não apresentava grandes problemas, pois o ar era expulso para área externa da câmara. Logo foi verificado que a melhor condição de funcionamento do dispositivo seria com seu segmento invertido, ou seja, com os braços submetidos à tração, conforme ilustrado pela Figura (SANTOS, 1998).

Logo após a válvula de controle de enchimento e esvaziamento da eclusa, onde o escoamento aumenta a velocidade para vencer a redução de seção, ocorre uma mudança brusca na geometria do conduto, o que leva a água a se chocar com as paredes, base e teto do aqueduto, provocando assim vórtices e turbilhonamento da água, onde ocorrem pressões positivas na base e negativas no teto. Esta situação pode causar o fenômeno de ressalto hidráulico (submerso e confinado) e também o fenômeno de cavitação dentro do conduto. Estes dois fenômenos são indesejáveis e devem ser evitados ou pelo menos minimizados, para que não causem o arrancamento de material das paredes do conduto e nem tampouco formem quantidades de bolhas de ar que possam causar perturbações na superfície da câmara da eclusa onde ficam as embarcações (DALLA CORTE et al, 2012).

Portanto o escoamento nos aquedutos de uma eclusa de navegação especialmente a jusante de comportas tipo segmentos invertidas apresenta um regime complexo e difícil de identificar um comportamento característico. Existe, hoje, além do material teórico, diversos estudos baseados em modelos físicos experimentais e mais recentemente, ainda modelos numéricos que auxiliam no entendimento. Estes estudos apresentam coeficientes e metodologias que norteiam as etapas iniciais dos projetos, porém isso não elimina a necessidade de estudo em modelo reduzido para a construção de eclusas, pois cada estrutura de acordo com as suas características construtivas impõem um comportamento único do escoamento (KEMPKA, 2011).

3.3.1 Perda de carga

Segundo Azevedo Netto (1998) a perda de carga total é o somatório das perdas de carga distribuída e localizada, sendo a perda de carga distribuída a energia utilizada pelo escoamento para vencer a rugosidade da tubulação nos trechos retilíneos de instalações pressurizadas. A perda de carga localizada se dá devido aos diversos acessórios que fazem parte dessas instalações. Esses acessórios alteram o módulo ou a direção da velocidade e conseqüentemente afetam a pressão verificada localmente. Isso se reflete em acréscimo de turbulência que produzem as denominadas perdas de carga localizadas. Para grande parte dos acessórios não existe um tratamento analítico para o cálculo das perdas de carga, sendo um campo eminentemente experimental, podendo ser expressas pela Equação 1. Santos (2012) salienta que o coeficiente de perda de carga (K), pode ser obtido experimentalmente através do conhecimento da carga hidráulica de montante e jusante associadas à velocidade média na entrada.

$$\Delta h = k \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Onde:

Δh = perda de carga singular;

k = coeficiente de perda de carga singular;

V = velocidade média do escoamento;

g = aceleração da gravidade.

Segundo Santos (1998) os cálculos para o enchimento e esvaziamento que podem ser obtidos de forma direta são aqueles em função da vazão e dependentes da perda de carga. Também existe a variação das cargas hidráulicas no tempo devido à diferença de nível d'água entre o reservatório e a câmara durante os processos de enchimento e esvaziamento, além da perda de carga localizada que varia com as leis de manobra de abertura da válvula (SANTOS, 2012). A Figura 7 mostra a linha de energia e a linha piezométrica média a jusante de uma comporta tipo segmento invertida.

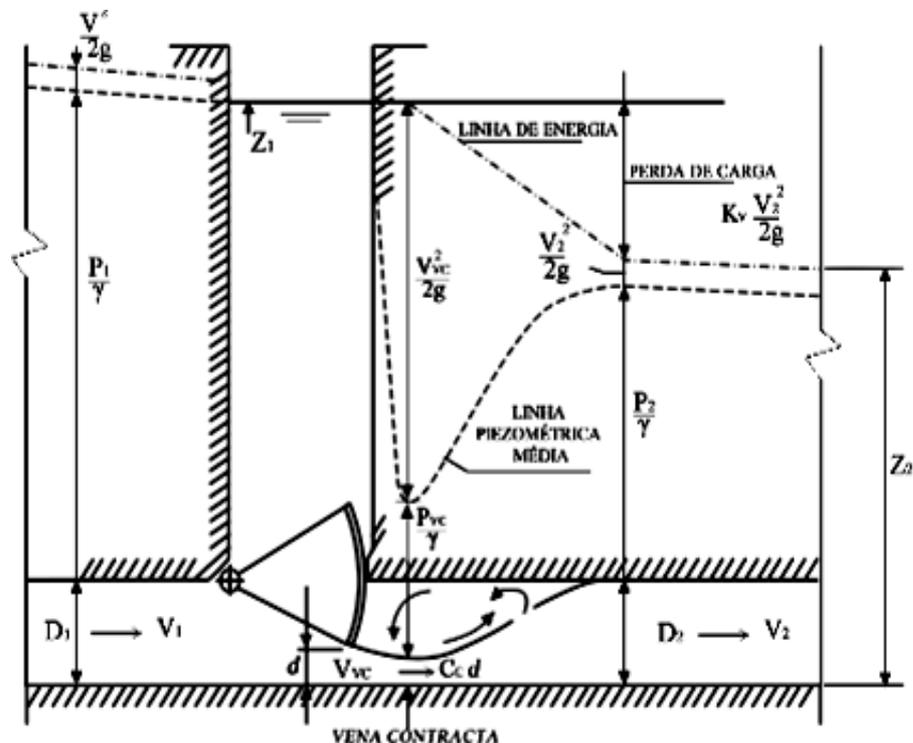


Figura 7 - Linha de energia e piezométrica ao longo do fluxo próximo a uma comporta tipo segmento invertida.

Fonte: adaptado de Santos, 2012.

Dutra (2014) apresentou os resultados de perda de carga obtidos no modelo físico implementado no laboratório de hidráulica da Universidade Federal de Pelotas, o qual é o mesmo utilizado para este estudo, inserindo os coeficientes (K) na Figura 8 (na cor vermelha) apresentada por USACE, 1975.

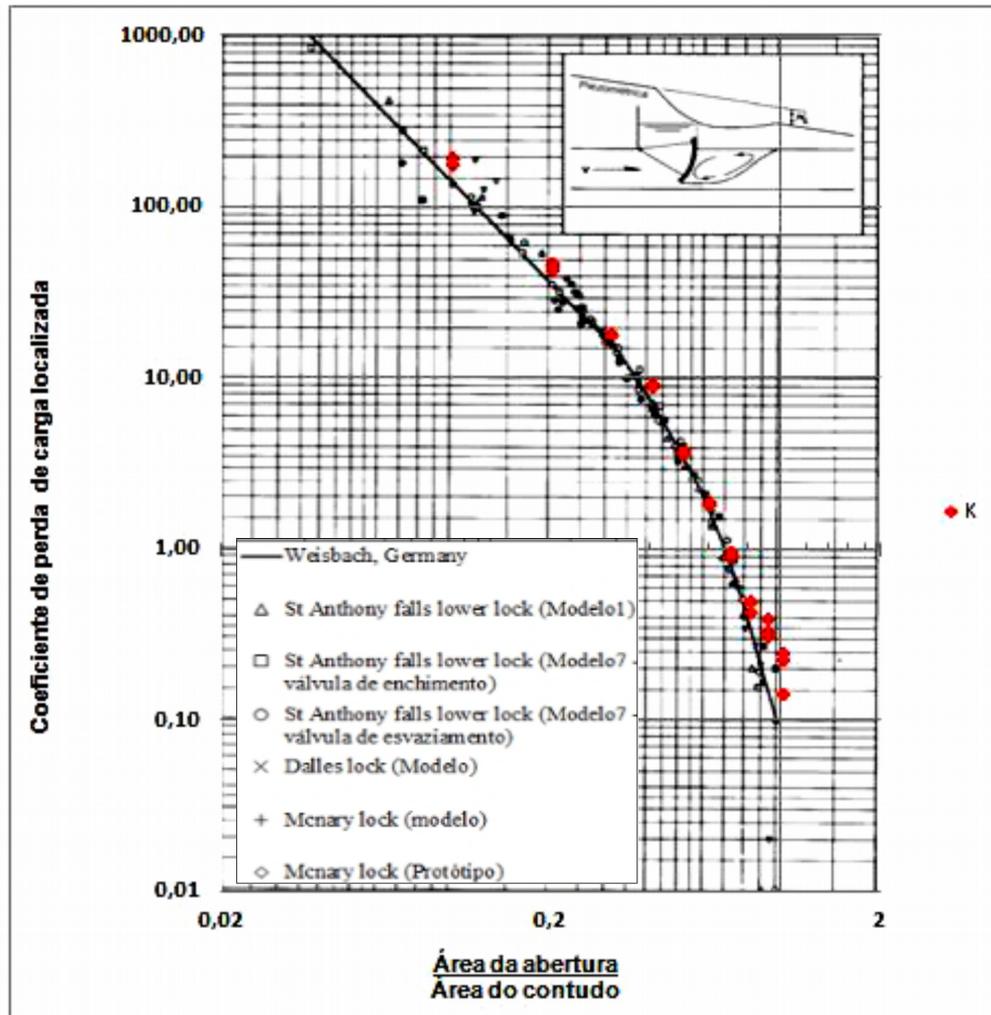


Figura 8 - Comportamento do coeficiente de perda de carga da comporta tipo segmento invertida.

Fonte: adaptado de Dutra (2014)

3.3.2 Vena contracta

O comportamento do escoamento sob a comporta tipo segmento invertida apresenta uma condição semelhante a dos orifícios, onde o jato imediatamente após a comporta sofre uma contração, aumentando a velocidade média do escoamento. A “vena contracta” fica exatamente no ponto de maior redução da seção de escoamento, conforme a Figura 9 (KEMPKA, 2014). Segundo Dourado (1986) o coeficiente de contração (C_c) pode ser determinado experimentalmente estabelecendo uma relação entre a altura do escoamento na seção contraída da comporta e o seu grau de abertura (b), conforme Equação 2. A venacontracta é importante para que se possa avaliar a velocidade média máxima que pode ocorrer após a comporta. Esta característica do escoamento é

fundamental para o dimensionamento correto do material a ser utilizado na estrutura do conduto, por causa da erosão e também do favorecimento a cavitação devido às altas velocidades que causam zonas de baixa pressão (KEMPKA, 2014).

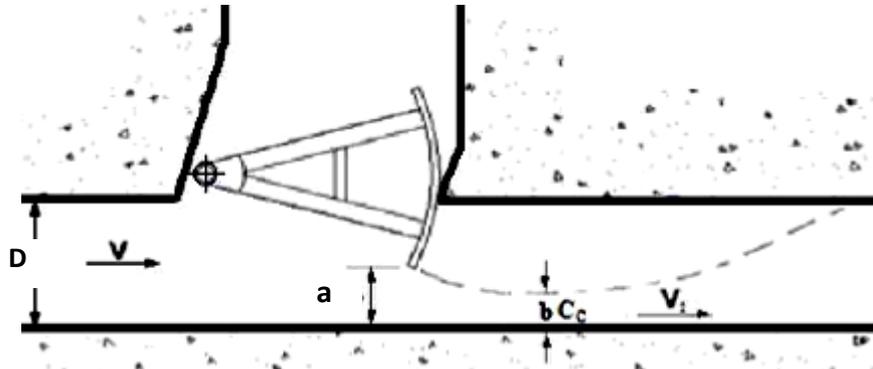


Figura 9 - Parâmetros hidráulicos e geométricos do escoamento.

Fonte: adaptado de Hammack e Stockstill (2011).

$$C_c = b/a \quad (2)$$

Kempka (2014) reuniu os resultados de vários estudos já realizados em comportas do tipo segmento invertidas, a cerca do coeficiente de contração. A Figura 10 mostra que o coeficiente de contração varia na faixa de 0,60 e 0,90 em função da porcentagem de abertura das comportas.

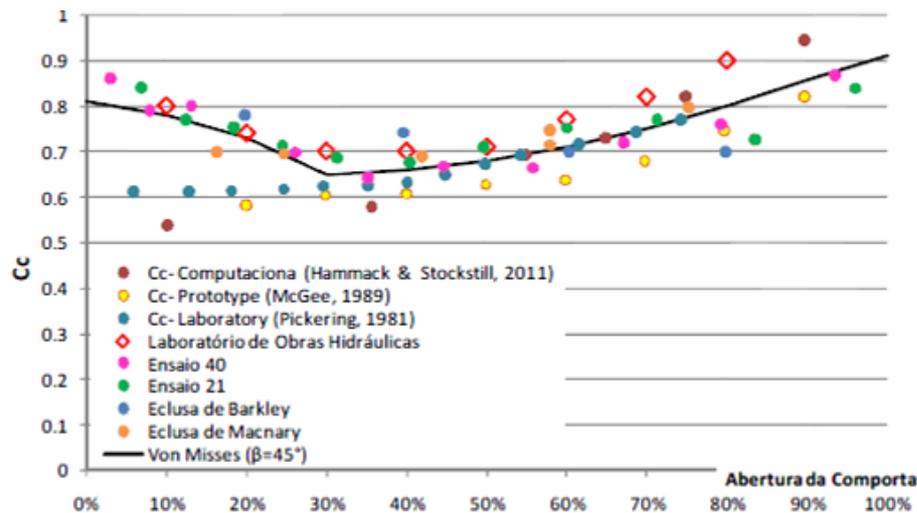


Figura 10 - Resultados de vários estudos já realizadas em comportas do tipo segmento invertidas a cerca do coeficiente de contração.

Fonte: Kempka, 2014.

3.4 Patologias em Eclusas

As patologias comumente encontradas em eclusas são: desgastes na comporta produzidas por vibrações, "*downpull*" e "*uplift*", esforços nas amarras das embarcações e a erosão no concreto dos aquedutos. Estas patologias ocorrem principalmente por causa dos esforços hidrodinâmicos intensos que existem nestas estruturas e especialmente logo após a comporta e sob ela, pois neste ponto são geradas altas velocidades e flutuações de pressões, que tendem a produzir cavitação e inserção de ar no fluxo do escoamento. Isso impõe à comporta cargas extremas que a desgastam ao longo do tempo e também impõem pressões negativas associadas às altas velocidades que produzem forças que tendem a arrancar o material das paredes do aqueduto (SANTOS, 1998).

3.4.1 Esforços hidrodinâmicos e vibrações em comportas

As comportas em aquedutos de eclusas ficam expostas a diversos esforços e solicitações que causam o desgaste da mesma, devido às altas velocidades do escoamento principalmente a jusante e sob a comporta tipo segmento invertida e também devido à flutuação de pressões durante as operações de eclusagem. Nas menores aberturas, devido à carga hidráulica na chaminé de equilíbrio, as comportas ficam submetidas a forças que tendem a empurrá-las para baixo (*downpull*). Já nas aberturas maiores são gerados esforços que tendem a impulsionalá-las para cima (*uplift*), a partir de empuxos. A Figura 11 ilustra estes esforços.

Os esforços de *downpull* e *uplift* implicam em elevados custos relativos aos equipamentos de levantamento destas comportas, o que leva os projetistas a procurarem reduzir ao máximo os esforços de acionamento. Sendo assim é muito importante a determinação precisa dos esforços hidrodinâmicos causados pelo escoamento através das comportas, os quais estão presentes durante as operações de abertura e fechamento das mesmas, e podem causar sérios problemas operacionais, incluindo o não fechamento das comportas ou mesmo sua abertura. A natureza dos esforços hidrodinâmicos tipo *uplift* e *downpull* consiste nas diferentes distribuições de pressão verificadas no teto e no fundo do aqueduto junto à comporta durante o escoamento. Estas distribuições de pressão são afetadas por diversos fatores incluindo o tipo de escoamento, características geométricas das comportas e

dos poços, características geométricas dos condutos ou tomadas d'água, perdas de carga a montante e a jusante das comportas, condições de aeração e propriedades dos fluido (SILVA, 2011).

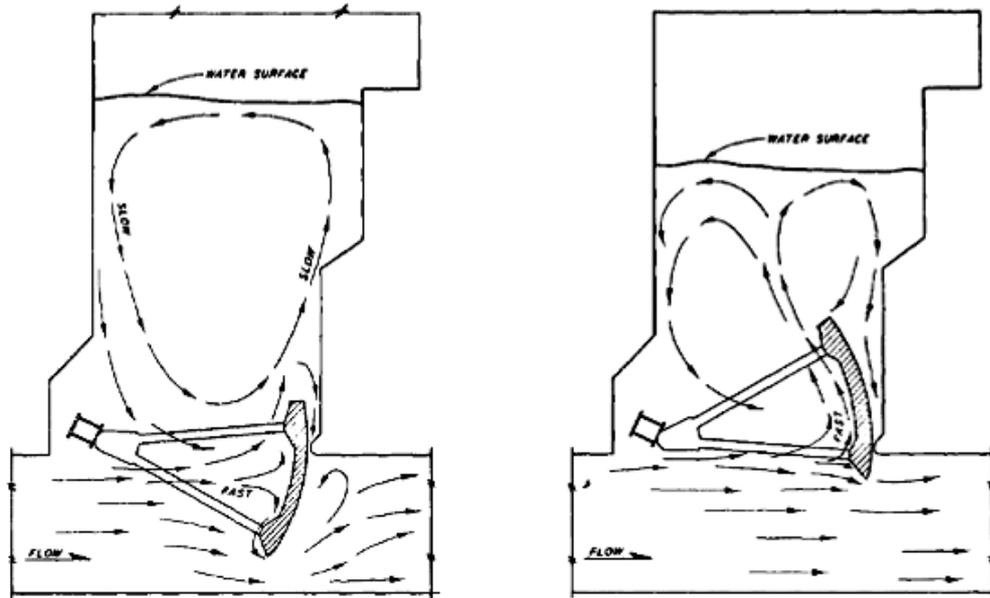


Figura 11 - Efeitos de downpull (à esquerda) e uplift (a direita).

Fonte: USACE, 1975

Existe, também, um contínuo esforço de tração durante todo o período de enchimento e esvaziamento da câmara e ainda o esforço de compressão gerado quando está fechada devido as cargas hidráulicas a jusante e montante. Kaercher (2007), se referindo a comportas de maneira geral, afirma que todos estes esforços produzem folgas que desgastam e reduzem sua eficiência ao longo da vida útil.

Kaercher (2007) comenta que o estudo do padrão vibratório de sistemas dinâmicos é de importância fundamental para um projeto seguro, econômico e durável destes sistemas e que os carregamentos dinâmicos que as comportas estão sujeitas podem ser originados de diversas fontes. A maneira como essas estruturas podem vibrar depende fundamentalmente das características do sistema estrutural (distribuição de massa, rigidez, amortecimento) e das características da força excitadora. Kaercher (2007) corrobora com Santos (1998), pois concorda que as vibrações nas comportas podem ocorrer devido a grande flutuação de pressões e acrescenta também os esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação como possíveis agentes causadores de vibrações.

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).

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).

3.4.2 Erosão no concreto em condutos de eclusas

A erosão no concreto de condutos de eclusas de navegação se dá principalmente por três agentes causadores: a cavitação, a abrasão e o ataque químico. A cavitação ocorre em função de alterações bruscas de velocidade na região da comporta o que origina uma queda abrupta da pressão. Já a abrasão se dá pela entrada de sedimentos no conduto de adução do sistema hidráulico, sendo, então, carregados com o fluxo e se chocando com as paredes do conduto. Parte deste sedimentos se solubiliza e pode atacar quimicamente o concreto se trazer consigo agentes químicos agressivos. Também sabe-se que as características de operação das comportas tipo segmento invertidas de uma eclusa, podem atenuar ou amplificar uma futura erosão do concreto. (GRAHAM, 1998).

Erosão causada por cavitação

O processo de cavitação da água é a vaporização, ou seja, formação de bolhas, que ocorre por aumento da temperatura ou por redução da pressão, ou seja, para que o oxigênio dissolvido na água passe da forma líquida para a gasosa, é necessário que a água atinja a temperatura de vapor ou pressões de vapor (PORTO, 2006).

Graham (1998) comenta que a queda de pressão causada, por exemplo, por irregularidades na superfície do contorno sólido é geralmente abrupta e causada por

altas velocidades locais e linhas de corrente curvas. As bolhas ou cavidades muitas vezes começam a se formar perto de curvas ou descolamentos do escoamento, que são carregadas pelo fluxo e quando chegam a regiões de pressões mais altas colapsam. Porto (2006) indica que no caso dos aquedutos das eclusas este processo ocorre por redução da pressão em função das altas velocidades junto às comportas de controle.

Quando uma bolha de cavitação entra em colapso ou implode perto ou contra uma superfície sólida, uma pressão extremamente alta é gerada, o qual atua sobre uma área infinitesimal da superfície por um período de tempo muito curto. Uma sucessão destes impactos de alta energia pode danificar o material sólido. A progressão da erosão por cavitação em concreto não é tão bem documentada como em metais, porém sabe-se que para vários tipos de materiais, a erosão progride rapidamente após um período inicial de exposição e rapidamente encrespa a superfície com pequenas crateras ou poços (GRAHAM, 1998).

A cavitação pode ser classificada em cavitação vaporosa e cavitação gasosa. A cavitação por vaporização ocorre em líquidos com pouco gás e a gasosa em líquidos com gás emulsionado. A cavitação gasosa tem taxas muito mais lentas de crescimento das bolhas que a cavitação por vaporização, assim as implosões são de bolhas muito menores e desenvolvem uma potência bem inferior (SANTOS, 1998).

É importante destacar que a cavitação é também função das pressões instantâneas, das flutuações, e não apenas da pressão média. É claro que quanto maior a pressão média, mais distante da pressão de vapor e portanto em melhor situação “potencial” estará o escoamento a jusante das válvulas. E ainda, quanto menor a pressão média, na faixa sub-atmosférica, maior a amplitude da variação instantânea, o que, portanto, também recomenda pressões médias altas. Recomenda-se que as pressões médias mínimas a jusante das válvulas sejam nulas ou positivas, contudo a presença de alguma pressão negativa pode ser inevitável (SANTOS, 1998).

Ainda segundo Santos (1998), inúmeros são os fatores que influenciam no fenômeno de cavitação, tais como a geometria do contorno sólido, a amplitude da flutuação de pressões, a quantidade de partículas ou gás dissolvido na água, pressão, velocidade, aceleração, dentre outros.

O procedimento geral para quantificar a cavitação, segundo Santos (1998), é o estabelecimento experimental do comportamento de um parâmetro adimensional,

que normalmente é definido pela relação entre forças que previnem a cavitação e forças que causam a cavitação. É fundamental que esse parâmetro seja fácil de ser calculado com valores médios do fluxo, para que se possa proteger contra o fenômeno com simplicidade, convergindo para soluções adequadas, antes de maiores e custosas investigações em modelos. Dessa forma o autor apresenta o parâmetro adimensional de cavitação (K), conforme Equação 3.

$$K = \frac{P_v - P_{vg}}{P_u - P_v} \quad (3)$$

Sendo:

P_v a pressão relativa média a jusante da comporta;

P_{vg} a pressão relativa de vapor da água;

P_u é a pressão relativa a montante da comporta.

Ainda segundo Santos (1998), para projetos e estudos realizados especificamente para eclusas, tem-se usado o coeficiente adimensional de cavitação, na forma da Equação 4.

$$\sigma = \frac{P_{vena} + P_a - P_{vap}}{\frac{V_v^2}{2g}} \quad (4)$$

Sendo:

σ o índice de cavitação;

P_{vena} a carga de pressão na "venacontracta" (m.c.a.);

P_a a pressão atmosférica (m.c.a.);

P_{vap} a pressão de vapor na temperatura ambiente (m.c.a.);

V_v a velocidade média do jato na "venacontracta" (m/s);

Para comportas tipo segmento invertida Khatsuria, 2005 apud Palauro, 2012 apresentou os valores 0,2 a -0,3, como faixa em que ocorre cavitação. Cabe salientar que em estruturas hidráulicas considera-se a resistência de tração máxima do concreto da ordem de - 6 m.c.a..

Portugal (1981) recomendou para estruturas hidráulicas, considerar que o concreto resiste à tração máxima imposta por uma carga de pressão de até -6 mca.

Logo quando encontra-se a pressão média muito próxima deste valor limite, o sistema opera de forma que o concreto está submetido a esforços críticos, onde poderá ocorrer danos à estrutura em um curto espaço de tempo.

Segundo Graham (1998) a erosão causada por cavitação é facilmente distinguida da erosão causada por abrasão, pois ela corta o material em volta dos agregados mais grosseiros e apresenta superfície irregular e áspera (Figura 12), enquanto a erosão por abrasão possui uma aparência desgastada e regular.

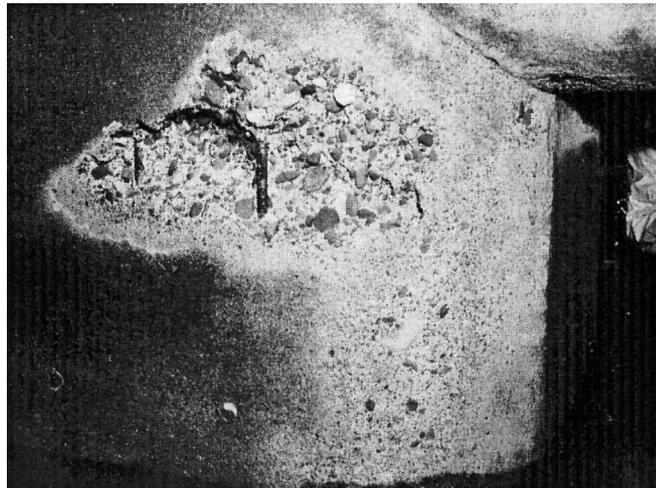


Figura 12 - Erosão por cavitação no ponto de contração em aqueduto de um sistema de navegação.

Fonte: Graham (1998).

Erosão causada por abrasão

Graham (1998) explica que as obras hidráulicas normalmente são construídas em um sistema complexo de rochas, solo e concreto. Logo, quando é aplicado o transporte de água em condutos de concreto, não se pode esperar a ausência de sedimentos, pois sabe-se que geralmente estes condutos são escavados em solo ou em rocha, tendo a suscetibilidade em carrear detritos que causem impactos diretos sobre a superfície do concreto.

A erosão por abrasão, então, são os danos causados pelo efeito abrasivo de lodo, areia, cascalho, rochas, gelo e outros detritos que incidem sobre uma superfície de concreto durante sua operação. A erosão por abrasão é prontamente reconhecida pelo aspecto liso na aparência do concreto de superfície, que se distingue dos pequenos orifícios e poços formados por erosão por cavitação.

A taxa de erosão depende de vários fatores incluindo o tamanho, a forma, a quantidade e a dureza das partículas a serem transportadas além da velocidade do escoamento e da qualidade do concreto. Um concreto de alta qualidade é capaz de resistir a altas velocidades de água por muitos anos com pouco ou nenhum dano, porém o concreto não pode suportar a ação abrasiva de detritos que impõem repetidos impactos sobre a sua superfície (GRAHAM,1998).

Em eclusas de navegação existem registros de erosão por abrasão. Um bom exemplo é a Eclusa da barragem de Alto Santo Antônio, nos Estados Unidos, que quando foi completamente esvaziada para reparar uma portão danificado, foi realizado também um exame do conduto de enchimento e esvaziamento lateral de descarga que revelou considerável erosão por abrasão. Esta erosão do concreto possuía profundidades máximas 58cm e foi causada por rochas de até 18cm de diâmetro as quais tinham entrado nas laterais, aparentemente durante o enchimento e esvaziamento. Conseqüentemente durante a operação de eclusagem habitual essas rochas eram agitadas, causando a erosão por abrasão do concreto (GRAHAM,1998).

3.5 Soluções Contra a Erosão do Concreto

Segundo USACE (1975) e Santos (1998) as principais soluções adotadas para amenizar/prevenir os fenômenos hidráulicos nocivos que geram erosão no material do aqueduto são: adição de ar no conduto; utilização de revestimentos resistentes; alteração na geometria da seção do aqueduto a jusante da comporta e estabelecimento leis de manobra especiais para a operação das comportas.

A adição de ar em condutos de eclusas de navegação é um método utilizado, mas a quantidade de ar deve ser 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 (SANTOS, 1998). 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 nível sub-atmosférico, incorrendo em cavitação (SHARMA, 1976 e ERBISTE, 1987).

A execução de concretos especiais também tem se revelado com limitações e estes têm sido restritamente aplicados às situações de menor efeito erosivo da

cavitação, como no caso dos partidores de fluxo horizontais ou verticais de sistemas de enchimento de eclusas (SANTOS, 1998). A adoção de concretos resistentes é onerosa e pode não eliminar o problema por completo, somente retardar os efeitos da erosão por cavitação. Por outro lado, o encamisamento das paredes a jusante de comportas com aço é mais eficiente e mais utilizado para proteger os aquedutos de eclusas.

Alguns pesquisadores têm investigado novas geometrias para os aquedutos da região das comportas. A ampliação do teto do conduto (Figura 13), como uma das possíveis soluções, proporciona o aumento da perda de carga localizada, reduzindo, com isso, o potencial de cavitação do escoamento (PICKERING, 1981).

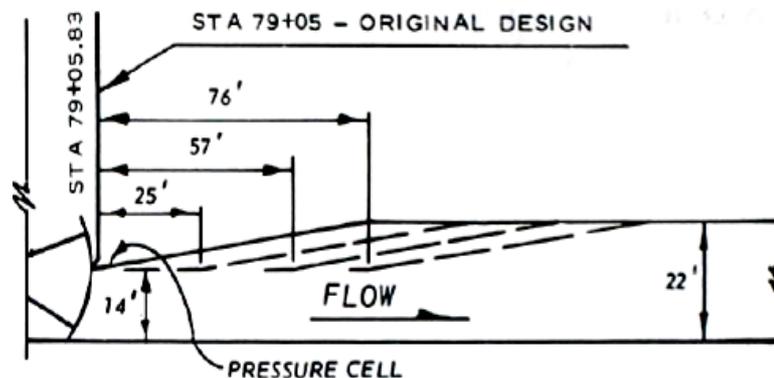


Figura 13 - Expansão do teto á jusante da comporta segmento invertida.

Fonte: Pickering, 1981

Santos (1998) indica que a inclinação de 10% (1V:10H) é a mais interessante em termos de ganho de pressão média, e que quanto mais próximo da comporta estiver o início da expansão, mais eficiente será esta alteração geométrica.

Dalla Corte et al. (2012) realizaram estudos a partir de simulação numérica comparando os resultados de um modelo sem expansões com simulações de modelo com expansão do teto. Neste estudo se verificou que a expansão no teto aumenta a pressão média mínima na base e no teto do conduto, a jusante da comporta, porém também constatou o aumento do comprimento longitudinal de abrangência delas, ou seja, estendeu-se para jusante a região de recirculação. Os autores constataram em todos os casos na região de recuperação da pressão que o modelo alterado apresentou pressões mais baixas do que o modelo original.

Segundo Santos (2012) a alteração da geometria através da expansão do teto do conduto realmente aumentaram as pressões médias mínimas como já afirmado por USACE, 2006.

Battiston (2013) comenta o estudo de Shiqin et al. (1999) que mostra também a opção da expansão lateral além da expansão do teto a jusante da comporta tipo segmento invertida (Figura 14). Os autores verificaram que essa geometria apresentou escoamento mais estável devido ao maior espaço existente a jusante das comportas, ajudando a reduzir a velocidade e melhorando as pressões nessa região em comparação com a geometria que possui somente expansão no teto.

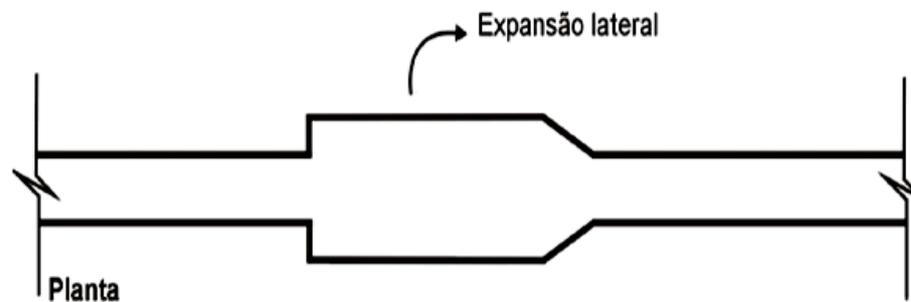


Figura 14 - Expansão lateral do aqueduto á jusante da comporta tainter.

Fonte: Adaptado de Shiqin et al., 1999 apud Battiston, 2013.

Pickering (1981) avaliou coeficientes de perda de carga para expansões no teto em diferentes posições, podendo notar que o efeito da posição de expansão do teto e os coeficientes de perda de carga nas comportas varia ligeiramente com a sua abertura. As expansões que começam a jusante dos locais críticos não têm nenhuma influência sobre os coeficientes de perda nas válvulas, sendo a localização crítica localizada a cerca de 3,5 a 4,5 diâmetros a jusante da comporta.

Os estudos de Shinqin et al. (1999) apud Battiston (2013) quanto ao rebaixamento da cota de assentamento da comporta e a introdução de expansões laterais, concluíram que com o rebaixamento da comporta, ocorre a elevação da pressão média e o conduto a jusante com maiores dimensões auxilia na redução das velocidades, reduzindo o potencial de cavitação do escoamento. Ainda Shengyi et al. (2005) apud Battiston (2013) avaliaram por meio de simulações numéricas a combinação de expansões no teto e na base do aqueduto. Os autores verificaram que essa geometria apresentou um escoamento mais estável devido ao maior espaço existente a jusante das comportas, reduzindo a velocidade e melhorando as

pressões nesta região em comparação com a geometria que possui somente expansão no teto. A Figura 15 mostra o como se dá o rebaixamento de cota da comporta.

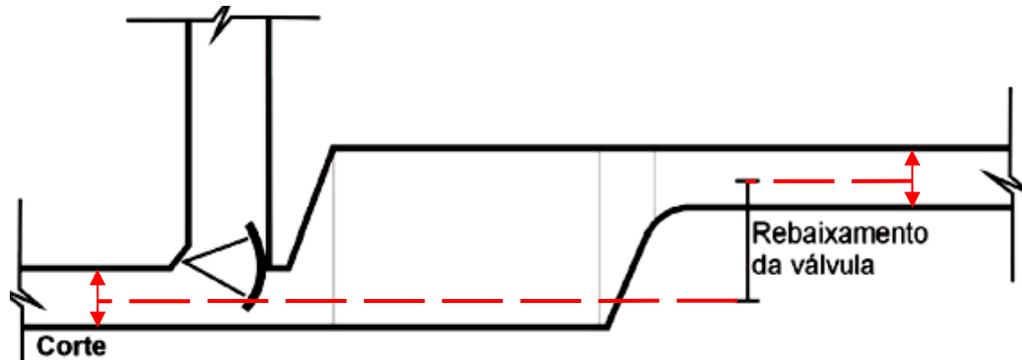


Figura 15 - Rebaixamento cota de assentamento da comporta.

Fonte: Adaptado de Shiqin et al., 1999 apud Battiston, 2013.

3.6 Estudos em Modelos Físicos para Caracterização do Escoamento a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertidas

Os modelos físicos são estruturas em escala reduzidas criadas em laboratório, com características semelhantes ao projeto que se quer implantar, desenvolvidas para estudar a eficiência da estrutura proposta. Mesmo que estas sejam projetadas em concordância com a legislação, normas técnicas e de segurança vigentes, ainda assim é necessário o estudo em modelos físicos reduzidos, pois nem mesmo com todo conhecimento teórico já existente a respeito da hidráulica é possível prever com exatidão o comportamento hidráulico. Portanto para evitar gastos futuros excessivos com manutenção e a reabilitação, além de paradas indesejáveis de funcionamento da estrutura, deve-se realizar o estudo hidráulico prévio da mesma.

A semelhança entre dois sistemas hidráulicos, ocorre quando a relação entre as forças homólogas em ambos permanece constante. A escala do modelo varia juntamente com as incertezas que se quer administrar, onde quanto maior a escala, maiores também as incertezas, e quanto menor a escala (maior o modelo), portanto menores os efeitos de escala e incertezas quanto ao projeto.

De Mulder (2011) comenta sobre a potencialidade de se utilizar modelos experimentais e numéricos em conjunto no projeto de eclusas de navegação, e define esta abordagem como “metodologia híbrida”. Desta forma, pode-se atingir os critérios de desempenho desejados a um custo menor. Além disso, a verificação cruzada das informações obtidas em cada modelo contribui para aumentar a confiabilidade do projeto.

USACE (2006) afirma que tanto na fase de projeto quanto na análise de problemas específicos em eclusas já construídas os modelos experimentais em escala reduzida têm sido uma ferramenta amplamente utilizada. Estas simulações em modelos experimentais são realizadas para eclusas com quedas superiores a 12m de acordo com as características de cada projeto. A escala para redução de modelos experimentais mais utilizada é a escala 1:25, pois permite uma boa observação da turbulência do escoamento, além de facilitar a instrumentação para medições.

Os ensaios em modelo reduzido têm como finalidade a coleta 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) apud Battiston (2013), as atividades principais dos estudos experimentais das eclusas, especificamente no que diz respeito aos aquedutos de enchimento, estão ligadas à determinação:

- a) 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;
- b) do desenvolvimento das pressões médias em todo o circuito hidráulico de enchimento e esgotamento da câmara;
- c) dos coeficientes de perda de carga para o subsídio aos cálculos teóricos de enchimento e esgotamento.

Observações em modelos e em protótipos revelaram que para aberturas relativas da comporta em torno de 60% ocorrem as condições mais críticas para a ocorrência da cavitação, principalmente junto ao teto do conduto a jusante da comporta (USSAMI, 1983 e SANTOS, 1998).

Pickering (1981) apresentou os resultados para a distribuição das pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida (Figura 16), onde concluiu que as pressões mínimas ocorrem próximas ao teto. A localização da mínima pressão no teto do conduto se deu com a abertura de 60% e ficou entre 0,5 e 1,0 vez a dimensão de altura do conduto.

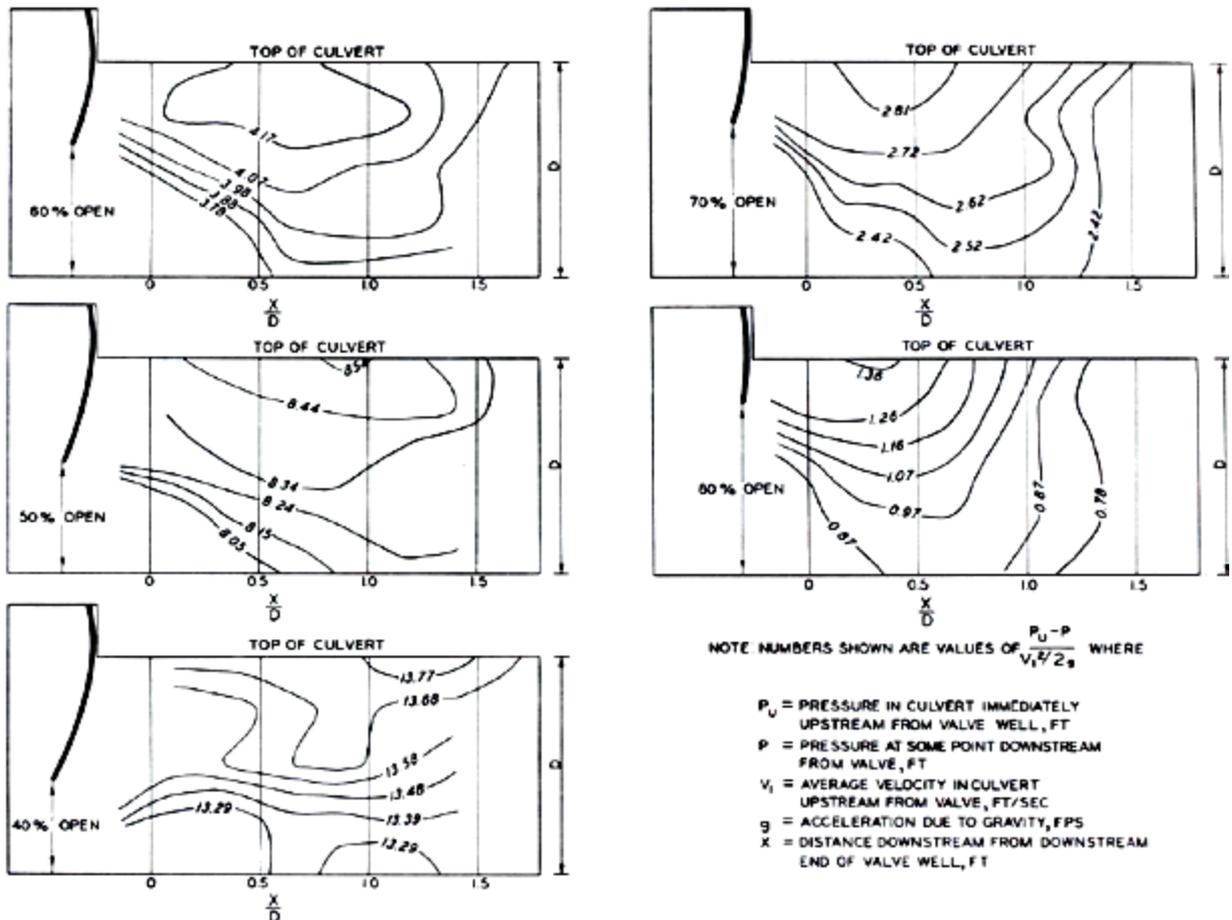


Figura 16 - Pressões mínimas a jusante da comporta tipo segmento invertida.

Fonte: Pickering, 1981.

Kempka (2011), Palauro (2012), Battiston (2013), Kempka (2014) e Dutra (2014) efetuaram estudos em um sistema genérico de enchimento e esvaziamento de câmara de eclusa com comporta segmento invertida, tendo por base um conduto retangular com 4m de lado (dimensões de protótipo). Kempka (2011 e 2014) e Battiston (2013) utilizaram o mesmo modelo de laboratório na escala 1:16, contudo com medições e condições de ensaio distintas. Battiston (2013) avaliou, também, as pressões a jusante da comporta tipo segmento invertida através de modelo numérico, bem como DallaCorte (2013) e Santos (2012). Já Palauro (2012) utilizou

um modelo similar, mas na escala 1:25 e estudou os regimes permanente e transitório de enchimento e esvaziamento de uma eclusa. Dutra (2014) estudou em modelo físico experimental na escala 1:32 as pressões médias a jusante de uma comporta tipo segmento invertida, modelo este também utilizado neste estudo.

Kempka (2011) apresenta na Figura 17 as variações dos índices de pressões (σ_{mod}) (Equação 5): médias, com 0,1% de probabilidade de não excedência, com 1% de probabilidade de não excedência e também o detalhe do comportamento destes índices frente ao parâmetro adimensional A_M (Equação 6) para a base do conduto.

$$\sigma_{\text{mod}} = \frac{P}{\gamma} \frac{V_v^2}{2g} \quad (5)$$

$$A_M = \frac{c}{V_v} \sqrt{\frac{a}{D}} \quad (6)$$

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{k_2} + \frac{D}{E.e} \right)}} \quad (7)$$

Onde:

P é a pressão no ponto considerado;

γ é o peso específico da água;

D é a altura do conduto (m);

c é a celeridade, expressa pela Equação 7 recomendada por Eletrobrás (2003);

a é a abertura da comporta;

ρ é a massa específica da água;

k_2 é o módulo de elasticidade da água;

E é o módulo de elasticidade do material do conduto;

e é a espessura do conduto.

Através dos gráficos comparativos Kempka (2011) gerou equações de ajuste, para as pressões médias e mínimas, tanto na base quanto no teto do aqueduto, apresentando um conjunto de equações para previsão destas pressões.

Palauro (2012) verificou que a distribuição longitudinal das pressões médias passa por um mínimo na região a jusante da comporta a uma distância inferior a 3 vezes a altura do conduto. Além disso, para uma mesma vazão as aberturas

menores geram pressões médias mínimas menores, concluindo, também, que para uma mesma abertura as maiores vazões geram pressões médias mínimas menores. Para uma mesma vazão e abertura da comporta as pressões médias do teto são sempre inferiores as da base. Com relação às pressões flutuantes Palauro (2012) concluiu que as máximas ocorrem em uma região próxima da comporta aproximadamente duas vezes a altura do conduto, tanto para base como para o teto e logo após decrescem rapidamente para jusante, acrescentando que as flutuações de pressão são sempre maiores na base do que no teto do conduto.

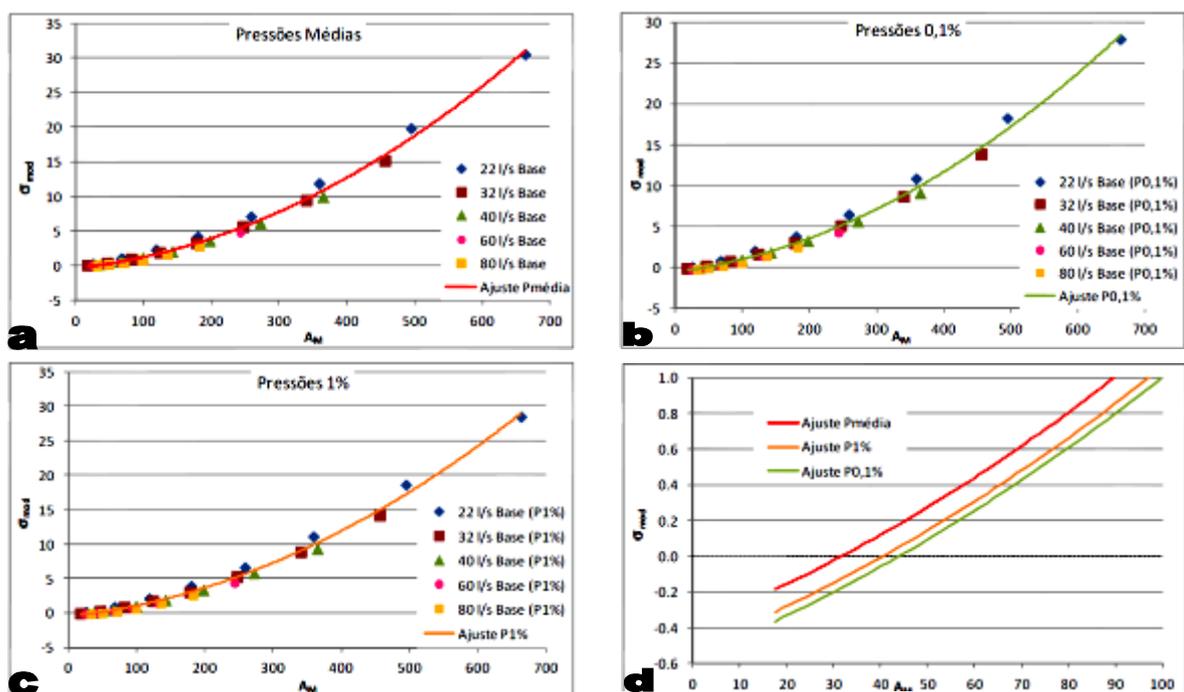


Figura 17a - Índices de pressões média e 17b - Índices de pressões mínimas 0,1%, 17c - Índices de pressões mínimas 1% e 17d - Índices de pressões médias e mínimas

Fonte: Kempka, 2011.

Palauro (2012) comparou as pressões em regime permanente e em regime transitório de escoamento, tendo como principal conclusão o fato de que a situação em regime permanente se mostra mais crítica que a situação em regime transitório. O autor detecta que em regime transitório as aberturas de 30% a 70% propiciam o surgimento de pressões negativas, ainda que as menores pressões sejam verificadas nas aberturas de 40% e 60%.

Battiston (2013) identificou que escoamentos com número de Reynolds superior a $3 \cdot 10^5$ tem o comportamento das pressões médias ao longo da base e do teto do aqueduto descrito por um coeficiente adimensional de posição (L_{adm}),

conforme Equação 8, e por um coeficiente adimensional de pressão média ($C\bar{P}$), conforme Equação 9.

$$L_{adm} = \frac{L_i}{D - a} \quad (8)$$

$$C\bar{P} = \frac{\bar{P} - \bar{P}_{a100\%}}{\frac{V_a^2 - V_p^2}{2g}} \quad (9)$$

Onde:

\bar{P} é a pressão média no ponto de medição para determinado grau de abertura da comporta;

$\bar{P}_{a100\%}$ é a pressão média no ponto de medição para a mesma condição de vazão de \bar{P} e 100% de abertura da comporta;

V_a é a velocidade média na seção da comporta;

A Figura 18a mostra o comportamento dos adimensionais de pressão em função do grau de abertura da comporta obtidos por Battiston (2013) na base do conduto. Os resultados encontrados para o teto estão apresentados na 18b.

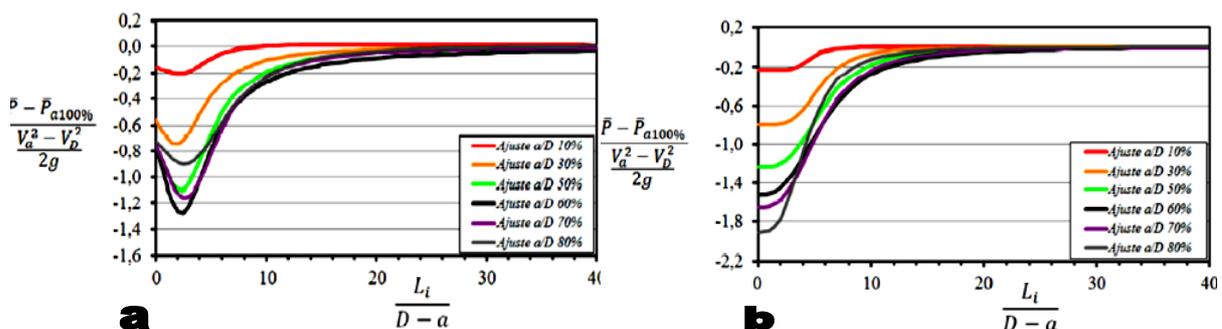


Figura 18a – Linhas de ajuste de pressão média para a base e 18b para o teto do aqueduto.

Fonte: Battiston, 2013

De maneira geral, Battiston (2013) mostra que a pressão na base do conduto a jusante da comporta diminui até encontrar a seção da *venacontracta*, trecho onde a energia potencial é convertida em energia cinética. Logo após esta seção a energia cinética volta a se converter em energia potencial, detectando 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.

Battiston (2013) concluiu que as flutuações de pressão junto à base e ao teto do conduto são 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.

Kempka (2014) conclui através de estudo em modelo físico que à medida que a abertura da comporta aumenta para uma mesma vazão, as pressões aumentam, indicando que para maiores aberturas maiores serão as pressões. Foi verificado, também, que os valores das pressões são inversamente proporcionais às vazões, ou seja, se a vazão aumenta, o valor da pressão média diminui na região onde ocorrem as pressões mínimas. Kempka (2014) detectou que para porcentagens de abertura superiores a 50% as pressões não atingem mais valores negativos na base da galeria e para porcentagens de abertura superior 70% as pressões não atingem mais valores negativos no teto da galeria.

Kempka (2014) concorda com Battiston (2013), quanto ao comportamento dos coeficientes de pressão, onde os dados provenientes de ensaios com número de Reynolds inferior a $3 \cdot 10^5$ diferem da tendência geral. Battiston (2013) estudou o comportamento do escoamento em conduto fechado, onde não existe interferência da gravidade no movimento do fluido, porém a inércia e a viscosidade devem ser consideradas. Logo foi utilizado o número de Reynolds que representa a relação entre as forças de inércias e as de viscosidade, encontrando que para os casos com a comporta parcialmente aberta, foi possível o agrupamento de condições com tendências similares. Foi considerado para o cálculo de Reynolds a 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 19 apresenta o número de Reynolds para cada ensaio encontrado por Battiston (2013). Com isso foi possível estipular que para os escoamentos com o número de Reynolds superior a $3 \cdot 10^5$ tem-se uma tendência característica geral do regime de escoamento.

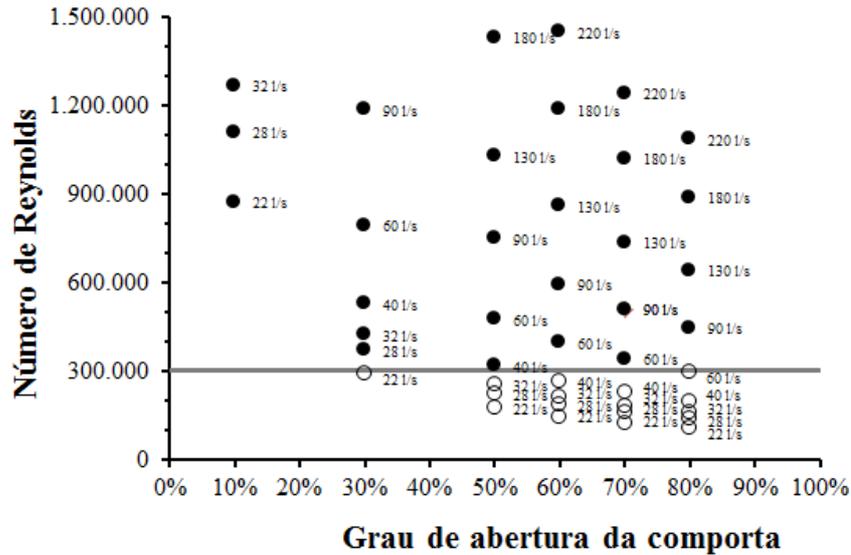


Figura 19 - Número de Reynolds das condições de ensaio de Battiston (2013).

Fonte: Battiston, 2013

Dutra (2014) concluiu através do estudo em modelo físico que os maiores valores de perda de carga se dão nas menores aberturas da comporta, diminuindo gradualmente até a abertura total da mesma. Foi verificado, também, que a estabilidade da pressão média tanto na base como no teto do conduto ocorreu a uma mesma distância de 1m da comporta, equivalente a 8 vezes a altura do conduto utilizado experimentalmente. Dutra (2014) verificou que o comportamento das pressões médias no teto e na base do conduto apresentaram comportamento semelhante, pois a pressão média decai com a proximidade da comporta até uma determinada distância (cerca de 1 vez a altura do conduto), a partir da qual a mesma volta a se elevar novamente tendendo a um comportamento estável.

Kempka (2014) sugeriu o adimensional “ Θ ” que é apresentado na equação 09, para a determinação de coeficientes adimensionais como parâmetro comparativo com os coeficientes de pressão “CP” na equação 10 para análise do comportamento do escoamento com abertura de 100% da comporta, ou seja, sem a influência da redução da seção transversal durante o escoamento.

$$\theta = \frac{Q^2}{g \cdot B^2 \cdot D^3} \quad (09)$$

Onde:

Q é a vazão;

B é a dimensão de largura do aqueduto; e
D é a dimensão de altura do aqueduto.

$$CP_{100\%} = \frac{P_{100\%}/\gamma}{\frac{V^2}{2g}} \quad (100)$$

Onde:

$P_{100\%}$ é pressão média (ou pressão com probabilidade de não excedência de 1% ou de 0,1%) para a abertura de 100% da comporta;

V é a velocidade média do escoamento no aqueduto;

g é a aceleração da gravidade.

4 Metodologia

Para esta pesquisa um modelo físico reduzido de um conduto de enchimento/esvaziamento de uma eclusa de navegação foi implantado no Laboratório de Hidráulica do Curso de Engenharia Hídrica da UFPEL, com a finalidade de simular o escoamento a jusante de uma comporta tipo segmento invertida, que é amplamente utilizada em eclusas de navegação de alta queda. Este modelo foi projetado na escala 1:32 tendo por base um conduto com 4m de lado, dimensão típica dos condutos de enchimento de eclusas de alta queda.

4.1 A Implantação e as Características do Modelo Experimental

O modelo físico é uma estrutura dotada de várias partes e equipamentos que o compõe: (i) sistema de armazenamento de água: reservatórios de montante e jusante; (ii) sistema de bombeamento: motor bomba e tubulação de recalque; (iii) trecho de circulação: tubulações e conexões; (iv) trecho de simulação: aqueduto em acrílico e comporta tipo segmento invertida; (v) controle de fluxo: registros gaveta, inversor de frequência; medidores eletromagnéticos; e medição de pressão: piezômetros e transdutores. Além destas partes, durante a implantação do modelo físico foram tomados alguns cuidados quanto à instalação e operação:

- a) manter afogado o escoamento através do nível do reservatório de jusante com o intuito de impedir a saída do escoamento a superfície livre;
- b) a escolha do material empregado para confecção do aqueduto, onde utilizou-se acrílico na região da comporta para propiciar a visualização do escoamento e a eventual presença de ar no sistema;
- c) as distâncias das singularidades até a comporta não são menores do que 10 vezes o raio hidráulico a jusante de qualquer uma destas, para que o escoamento esteja plenamente desenvolvido e tenha alcançado condições mais homogêneas na região da comporta;
- d) o trecho de ensaios, incluindo o trecho da comporta foi confeccionado em 5 módulos retilíneos, com comprimento de 900mm cada, unidos por

flanges, afim de garantir a manutenção ou até mesmo prevendo a necessidade de alteração de parte do conduto ou da geometria.

Na Tabela 2 estão descritas as principais características hidráulicas e geométricas do modelo experimental.

Tabela 2 - Principais parâmetros do modelo.

Parâmetro	Modelo
Vazão Máxima	43,2L/s
Seção Transversal do Aqueduto	0,125 x 0,125m
Comprimento do Aqueduto	5,0m
Raio da Comporta Segmento Invertida	0,1875m

A Figura 20 apresenta esquematicamente as instalações do sistema hidráulico experimental, estando em destaque o local onde está instalada a comporta.

Sistema de armazenamento e bombeamento

O sistema de armazenamento de água do modelo (Figura 21) é composto por dois reservatórios metálicos, com capacidade individual de 4m³, com dimensões de 1,5m x 2,0m x 1,4m construído em chapas em aço de 3mm de espessura. Os reservatórios são interligados por dois condutos metálicos com DN 200mm dotados de um registro de gaveta cada, os quais regulam a vazão em trânsito entre os reservatórios. Esta regulação permite a equiparação dos níveis ou ainda a imposição de diferentes níveis d'água no interior dos reservatórios, tornando possível a simulação de distintos níveis de afogamento na saída do aqueduto. Porém neste estudo manteve-se para todos os ensaios, o mesmo nível de afogamento tanto a montante quanto a jusante.

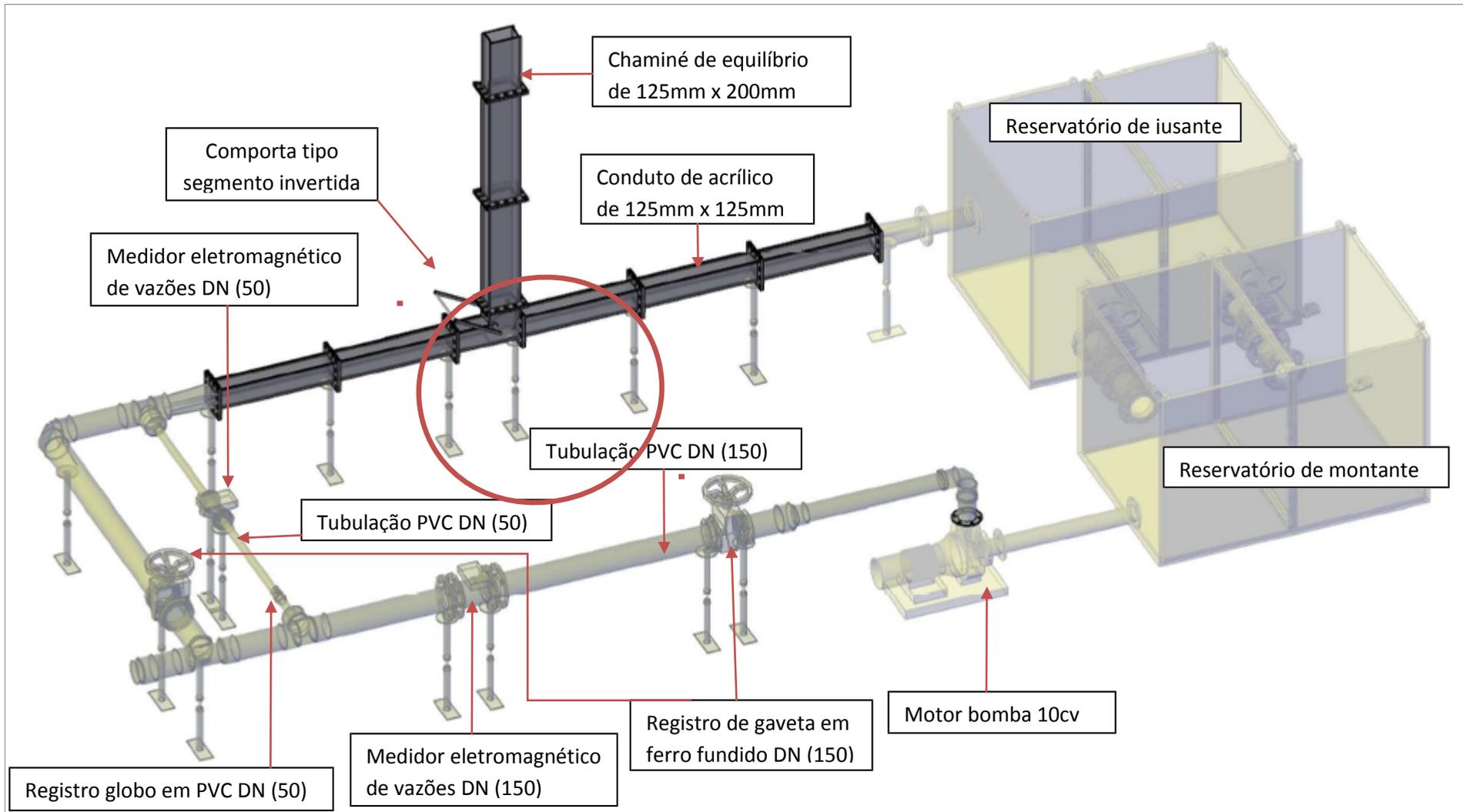


Figura 20 – Sistema hidráulico e modelo experimental.

Fonte – Elaborado pela autora.



Figura 21 - Reservatórios de montante e jusante - vista posterior.

O bombeamento é realizado através de um conjunto motor bomba, com potência de 10CV (Figura 22), do modelo INIB100160H, fabricada pela IMBIL, de eixo horizontal, 1750rpm, altura manométrica de 10m.c.a. e vazão máxima de 200m³/h. O diâmetro de sucção é de 125mm e o de recalque é de 100mm. O acionamento da mesma é realizado por meio de um quadro de comando elétrico, onde existe um inversor de frequência que atua na rotação da bomba.

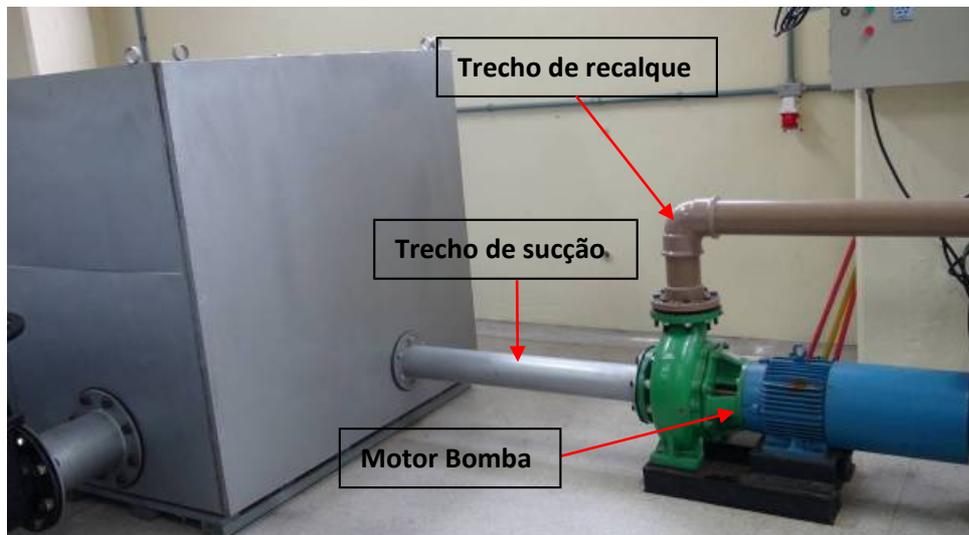


Figura 22 - Conjunto moto bomba de 10CV.

4.2 O trecho de circulação

O trecho de circulação (Figura 23) possui tubulação em PVC e se inicia logo após a tubulação de recalque. Com o objetivo de impor as menores vazões (inferiores a 7L/s) com maior precisão implementou-se uma tubulação de PVC com DN 50mm com seu correspondente medidor de vazão. Já as vazões maiores foram impostas por um trecho em paralelo, com DN150mm.

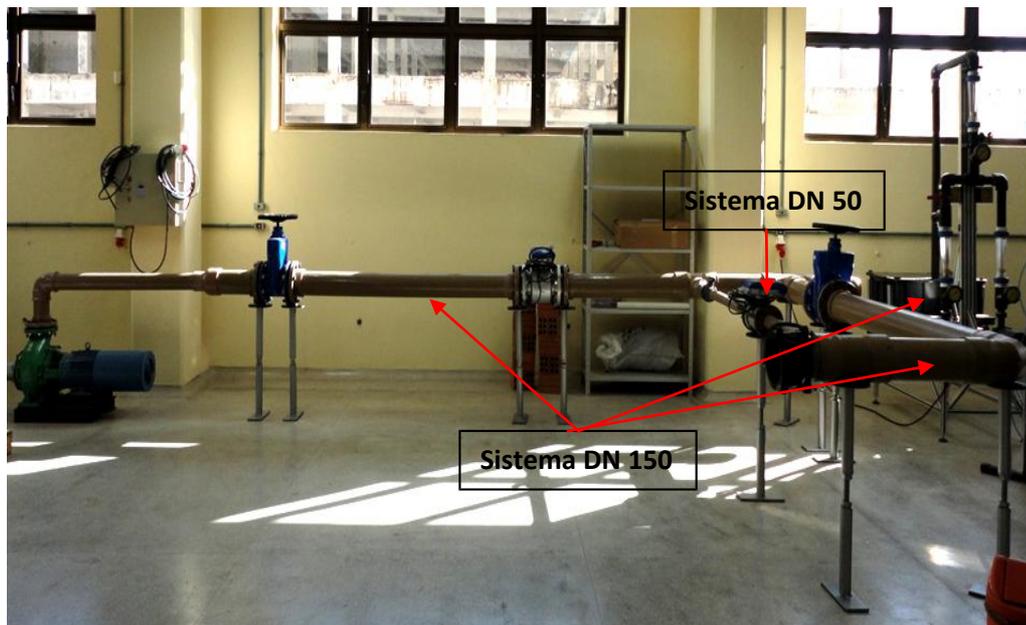


Figura 23 – Modelo em fase de implantação.

4.3 O trecho de simulação

O trecho de simulação do aqueduto implementado no modelo físico fica logo após a tubulação de circulação, a qual recebe a tubulação de seção quadrada em acrílico com 125mm de lado, onde se encontra a comporta tipo segmento invertida, que se situa a 2,1m de distância do trecho de circulação a montante e a 2,9m do reservatório de jusante (Figura 24). Este trecho foi confeccionado em acrílico transparente em 5 módulos retilíneos, além do módulo da comporta que possui 470mm de comprimento. Estes 5 módulos possuem o comprimento de 900mm cada, unidos por flanges, sendo 2 destes módulos a montante do módulo da comporta tipo segmento invertida e 3 a jusante da mesma. Ainda neste trecho encontra-se a

chaminé de equilíbrio que está instalada na posição vertical de forma perpendicular ao escoamento principal, localizada logo acima da comporta tipo segmento invertida, e um conduto de seção transversal retangular de 125mm x 200mm, composto por 3 módulos com 900mm de comprimento que junto ao módulo da própria comporta totaliza uma altura de 3 metros, com superfície livre. A chaminé de equilíbrio (Figura 24) tem a função de equilibrar das pressões a montante da comporta durante o transitório do escoamento, além de viabilizar a manutenção da mesma.

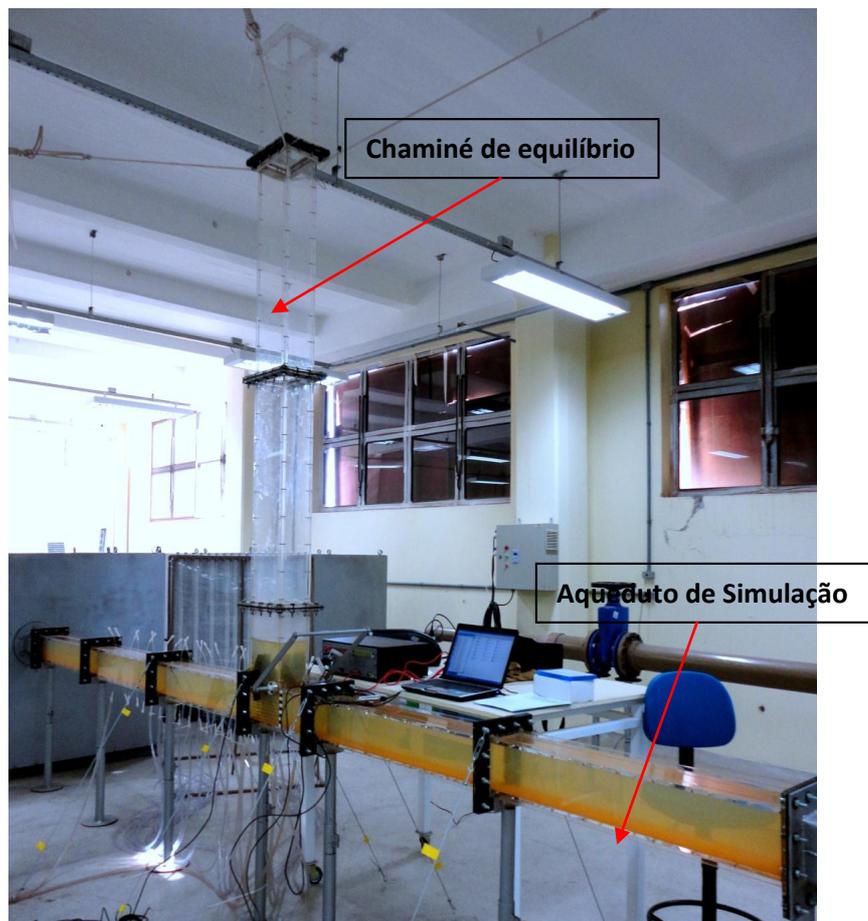


Figura 24 - Seção principal de ensaio: aqueduto e comporta segmento invertida.

A comporta tipo segmento invertida possui sua operação manual, através de uma alavanca que viabiliza a alteração dos graus de aberturas da mesma. Através de uma régua auxiliar fixada ao acrílico, com graduação de 10% variando entre 0% e 100%, pode-se regular a abertura da comporta desejada para cada ensaio.

4.4 Instrumentação e Métodos de Medição

4.4.1 Medições de pressão

A localização dos pontos de medição de pressão (tomadas de pressão) onde foram instalados piezômetros e transdutores foi definida de acordo com a estratégia de análise de dados, que visa a comparação com os resultados de outros autores (especialmente Battiston (2013) e Kempka (2014) e também tendo em vista as características já conhecidas do escoamento no aqueduto).

Assim, foram instalados 15 pontos no teto, que foram distribuídos com espaçamento inicial de 2,5cm e depois passaram para 5cm e por último para 10cm de distância entre si, sendo 1 ponto antes da comporta e os outros 14 a jusante da mesma. Já na base foram instalados 18 pontos, alinhados verticalmente com os pontos do teto excetuando 3 pontos que se localizam abaixo da comporta, e que não existem pontos correspondentes no teto, pois a chaminé de equilíbrio se encontra no alinhamento destes. O espaçamento entre os pontos de pressão é menor logo a jusante da comporta, pois ali existe uma zona de recirculação há necessidade de um detalhamento maior das pressões. A medida que vai se afastando da comporta o espaçamento entre as tomadas de pressão aumenta.

Uma tomada de pressão foi instalada a jusante, a uma distância de 1,62m da face da comporta, com a finalidade de ficar em uma posição suficientemente afastada dos efeitos hidráulicos provocados pela comporta e para que a mesma desempenhasse a função de controle nos ensaios. Todas as tomadas de pressão consistem em pequenos orifícios de 3mm de diâmetro no próprio conduto de acrílico, onde são acopladas pequenas mangueiras também de 3mm que recebem na outra extremidade uma conexão para a mangueira de 10mm ou conexão para os transdutores de pressão.

Para uma melhor compreensão dos dados de pressão coletados, as distâncias de cada uma das tomadas de pressão até a face da comporta foram medidas. Assim, para um mesmo ponto de medição essa distância varia de acordo com o grau de abertura da comporta. Desta forma, as distâncias com valores negativos representam tomadas de pressão instaladas a montante da comporta, conforme mostra a Figura 25.

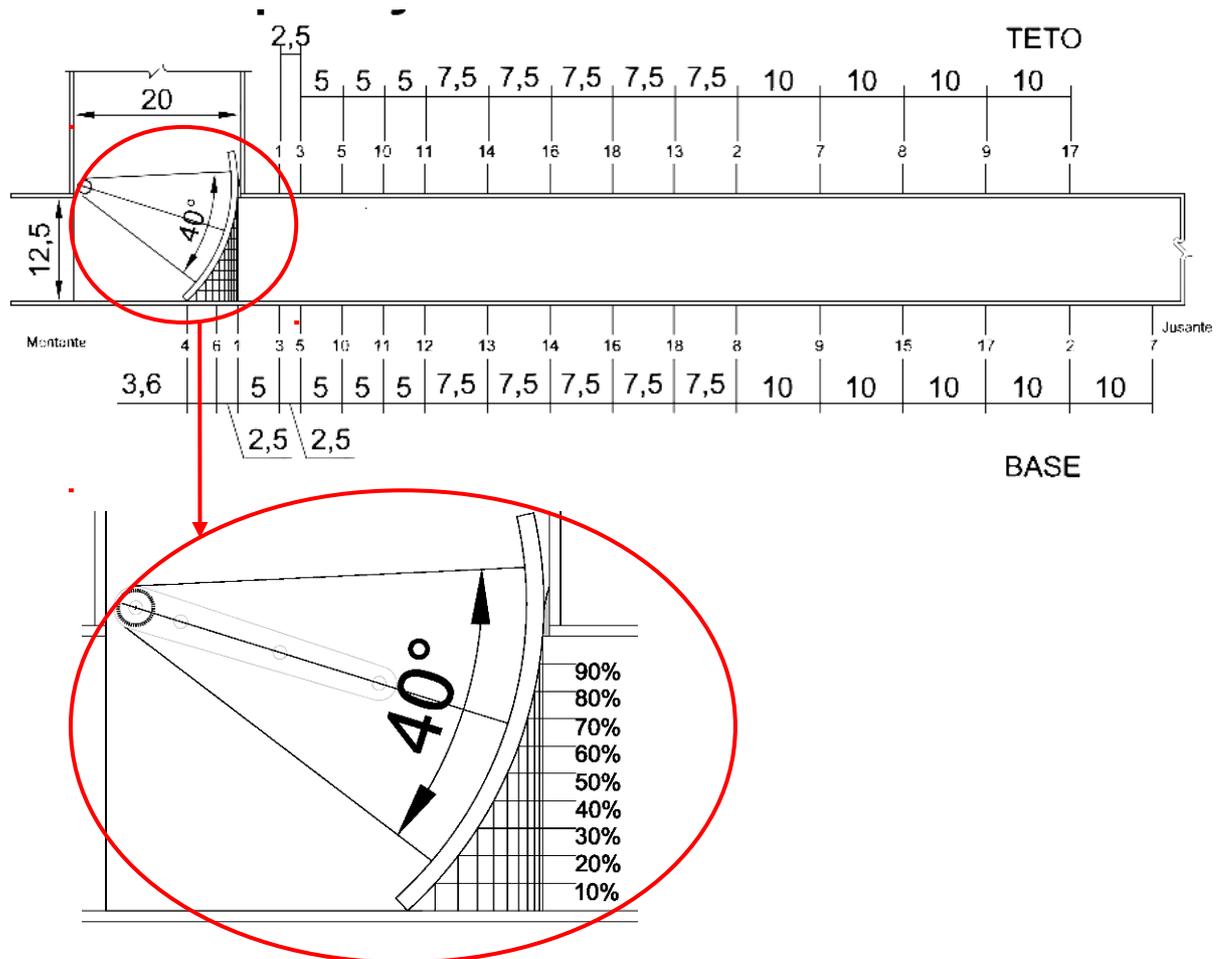


Figura 25 - Detalhamento distâncias entre os pontos de coleta dos dados e a comporta, estando todas as cotas em cm.

O sistema de coleta dos dados de pressão pode ser dividido em duas partes: o quadro de piezômetros e o sistema de aquisição dos transdutores.

O quadro de piezômetros é composto por 18 unidades de piezômetros com escala milimétrica, variando de -250mm a 620mm relacionados ao piso do conduto. Os piezômetros são constituídos de tubos de vidro fixos a uma estrutura de tubos e conexões de PVC, sendo estes ligados a mangueiras transparentes de 10mm e através de conexões que se ligam a mangueiras de 3mm acopladas diretamente ao aqueduto.

O sistema de aquisição de dados é responsável pela conversão analógica-digital de sinais. Desta forma é possível interpretar fisicamente um sinal elétrico que pode ser convertido em grandeza hidráulica a partir de procedimentos de ajustes e calibrações. A interface entre os transdutores utilizados nos ensaios e o conversor analógico-digital é comandada por um software. É através deste software, que se estabelecem as frequências de aquisição e os tempos de amostragem, bem como

os dados utilizados para a calibração dos transdutores. No caso deste estudo o tempo de aquisição foi de 10 minutos e frequência de 200Hz, valores idênticos àqueles utilizados por Dai Prá (2011). O sistema de aquisição é composto por: gabinete e fonte de alimentação, placa controladora de aquisição de dados, placa condicionadora de sinais e software compatível. O sistema de aquisição de dados é da marca LYNX modelo ADS 2000 (Figura 266).

Para a coleta dos dados de pressão foram utilizados transdutores de pressão são da marca ZÜRICH modelo PSI-420 (Figura 266), com as faixas de operação indicadas na Tabela 3 que foram especificados de acordo com o comportamento hidráulico esperado e visando possibilitar a medição de pressões ditas "instantâneas", ou seja, adquiridas a altas frequências.



Figura 26 - A esquerda, o sistema de aquisição de dados e a direita os transdutores de pressão

Tabela 3 - Quantidades e faixas de operação dos transdutores de pressão, marca Zürich, modelo PSI-420.

Quantidade	Faixa de operação (m.c.a.)
10	-1/+1
02	-0,5/+0,5
04	0/+2
02	-1/+3

4.5 Sistema de controle de vazões

Para o controle das vazões de simulação dos ensaios foram utilizados dois medidores eletromagnéticos (Figura 27) com diâmetros nominais diferentes: um com

DN150mm (para vazões superiores a 7L/s) e o outro com DN50mm (para vazões inferiores a 7L/s). Para impor e controlar as vazões foi utilizado um inversor de frequência (Figura 27) da marca WEG modelo CFW 08, que atua na rotação do motor da bomba. Através do quadro de comando elétrico possibilita o acionamento do motor bomba e também o aumento e redução da vazão no modelo.



Figura 27 – Imagens do medidor de vazão eletromagnético e do inversor de frequências.

4.6 Execução dos Ensaios e Coleta de Dados

Antes de iniciar cada um dos ensaios executava-se a etapa de verificação das condições de funcionamento do sistema, que consistia em uma série de passos a serem seguidos a fim de garantir o perfeito funcionamento do sistema e as mesmas condições de ensaio sempre, exceto vazão e abertura da comporta que eram variáveis. Assim, era verificado o nível d'água nos reservatórios, checado o sistema de aquisição e a funcionalidade dos transdutores, expulsas as bolhas de ar nas mangueiras dos piezômetros, transdutores e no sistema de bombeamento e circulação.

Na etapa de realização dos ensaios, sem considerar os ensaios preliminares ou ensaios repetidos, foram realizados 156 ensaios, sendo 78 ensaios em uma primeira bateria com combinações distintas de abertura e vazão conforme tabela 4 , e logo após mais 78 ensaios com condições hidráulicas idênticas a primeira bateria apenas com a troca dos equipamentos de medição de pressão (piezômetros e transdutores) entre teto e base. Durante a primeira etapa de realização dos ensaios,

o quadro de piezômetros foi instalado no teto para a coleta das pressões médias e os transdutores foram instalados na base do aqueduto para a coleta das pressões flutuantes, conforme a Figura 28. Após a realização da primeira bateria foram invertidas as instalações dos medidores de pressão, os piezômetros passaram para a base e os transdutores para o teto do aqueduto nos exatos pontos de coleta de dados utilizados anteriormente e todo o processo de ensaios foi repetido.

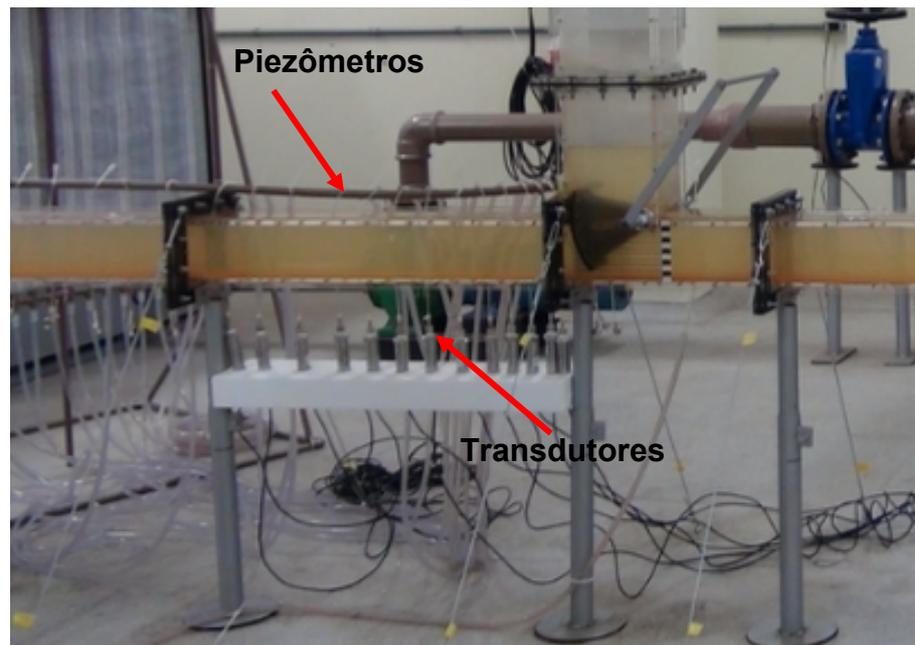


Figura 28 - Primeira bateria de ensaios: fase de instalação dos transdutores de pressão na base e piezômetros no teto.

Cada ensaio para determinada abertura e vazão se deu da seguinte forma:

- a) posicionava-se a comporta na abertura de interesse do ensaio;
- b) acionava-se o conjunto motor bomba e ajustava-se a vazão pelo inversor de frequência acompanhando os valores indicados pelos medidores eletromagnéticos;
- c) estabilizada a vazão (regime permanente) efetuavam-se as leituras dos níveis d'água nos piezômetros de controle de montante e jusante;
- d) na sequência iniciava-se a aquisição de dados, que durante os seus 10 minutos de duração, eram feitas também as leituras dos piezômetros na face contrária à medição dos transdutores.

Tabela 4 - Condições de Ensaio

Q (L/s)	10%		20%		30%		40%		50%	
	o	Re	o	Re	o	Re	o	Re	o	Re
3,9	x 50,9	3,0E+05	x 6,4	1,5E+05	x 1,9	1,0E+05	x 0,8	7,6E+04	x 0,4	6,0E+04
5,7	x 108,6	4,4E+05	x 13,6	2,2E+05	x 4,0	1,5E+05	x 1,7	1,1E+05	x 0,9	8,8E+04
7,1	x 168,6	5,5E+05	x 21,1	2,8E+05	x 6,2	1,8E+05	x 2,6	1,4E+05	x 1,3	1,1E+05
10,6			x 47,0	4,1E+05	x 13,9	2,7E+05	x 5,9	2,1E+05	x 3,0	1,6E+05
14,1			x 83,1	5,5E+05	x 24,6	3,6E+05	x 10,4	2,7E+05	x 5,3	2,2E+05
19,8					x 48,6	5,1E+05	x 20,5	3,8E+05	x 10,5	3,1E+05
23,0					x 65,5	5,9E+05	x 27,6	4,5E+05	x 14,2	3,6E+05
27,4							x 39,2	5,3E+05	x 20,1	4,2E+05
31,8							x 52,8	6,2E+05	x 27,1	4,9E+05
Q (L/s)	60%		70%		80%		90%		100%	
	o	Re	o	Re	o	Re	o	Re	o	Re
3,9	x 0,2	5,0E+04	x 0,1	4,3E+04	x 0,1	3,8E+04	x 0,1	3,4E+04	x 0,1	3,0E+04
5,7	x 0,5	7,4E+04	x 0,3	6,3E+04	x 0,2	5,5E+04	x 0,1	4,9E+04	x 0,1	4,4E+04
7,1	x 0,8	9,2E+04	x 0,5	7,9E+04	x 0,3	6,9E+04	x 0,2	6,1E+04	x 0,2	5,5E+04
10,6	x 1,7	1,4E+05	x 1,1	1,2E+05	x 0,7	1,0E+05	x 0,5	9,1E+04	x 0,4	8,2E+04
14,1	x 3,1	1,8E+05	x 1,9	1,6E+05	x 1,3	1,4E+05	x 0,9	1,2E+05	x 0,7	1,1E+05
19,8	x 6,1	2,6E+05	x 3,8	2,2E+05	x 2,6	1,9E+05	x 1,8	1,7E+05	x 1,3	1,5E+05
23,0	x 8,2	3,0E+05	x 5,2	2,5E+05	x 3,5	2,2E+05	x 2,4	2,0E+05	x 1,8	1,8E+05
27,4	x 11,6	3,5E+05	x 7,3	3,0E+05	x 4,9	2,7E+05	x 3,4	2,4E+05	x 2,5	2,1E+05
31,8	x 15,7	4,1E+05	x 9,9	3,5E+05	x 6,6	3,1E+05	x 4,6	2,7E+05	x 3,4	2,5E+05

Devido ao controle do grau de abertura da comporta ser realizado manualmente (Figura 29), para minimizar os erros humanos impostos pela relativa dificuldade de posicionar a exata abertura da comporta, realizaram-se todas as medições, com os transdutores na base e com os piezômetros no teto, com o mesmo grau de abertura da comporta, alterando as vazões. Após foram realizados os mesmos ensaios porém com os transdutores no teto e os piezômetros na base.

Comporta tipo
segmento invertida.

Régua com intervalos

Sentido do Fluxo

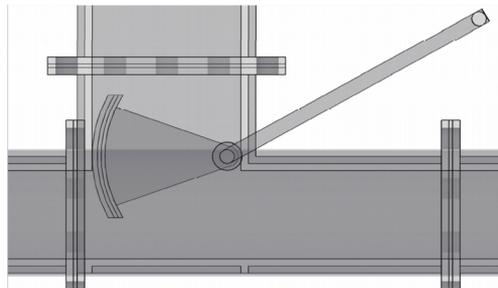


Figura 29 – Comporta tipo segmento invertida.

4.7 Etapa de Análise dos Dados

Consistência dos dados

Passada a etapa de coleta de dados foi iniciada a etapa de consistência dos dados das pressões médias, instantâneas e dos níveis d'água na chaminé de equilíbrio verificando padrões de comportamento por meio de estatística básica e identificação visual das linhas de tendência através de gráficos comparativos. Nesta etapa de análise de consistência dos dados das pressões flutuantes o transdutor 15 apresentou resultados incoerentes e os resultados deste transdutor foram descartados. Também foram encontrados e ratificados alguns erros de leitura dos piezômetros.

Para a análise de consistência dos dados médios (piezômetros) foram gerados gráficos comparativos entre a carga de pressão e a posição da tomada de pressão e também entre a carga de pressão e vazão ensaiada. Sabe-se através de estudos anteriores como Kempka (2011), Palauro (2012), Battiston (2013), Kempka (2014) e Dutra (2014) que existe uma tendência de comportamento das pressões médias. A partir disso e do agrupamento dos dados experimentais para diferentes aberturas foi possível encontrar alguns erros e suas origens. Como por exemplo, quando se constatou um erro de leitura no piezômetro 16 onde o valor medido seria 304mm, mas foi registrado o valor de 204mm para a vazão de 27,4L/s (Figura 30). Trata-se de um erro de fácil detecção que permitiu verificar preliminarmente as características dos dados e a confiabilidade dos resultados experimentais.

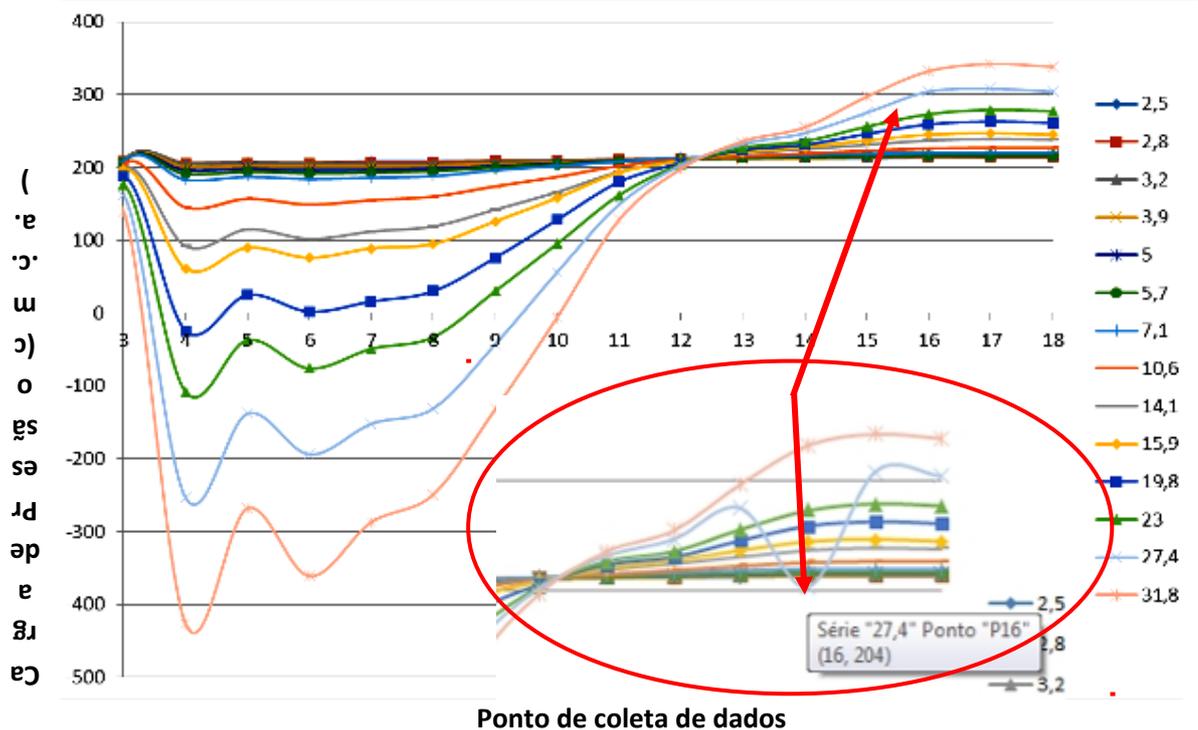


Figura 30 – Carga de Pressão (cm.c.a.) versus Piezômetro instalado no base para abertura de 50%.

Para verificação da consistência dos dados de nível d'água de montante (chaminé de equilíbrio) e jusante, foram plotados gráficos comparando os níveis verificados na primeira bateria de ensaios com piezômetros no teto, com a segunda bateria de ensaios com os piezômetros na base, pois a preocupação sempre foi manter as mesmas condições de ensaio para as duas baterias e sendo o ajuste do grau de abertura da comporta manual, foram necessários cuidados especiais, especialmente nas menores aberturas (10% e 20%). A Figura 31 apresenta um exemplo comparando os níveis d'água na chaminé de equilíbrio para montante entre as baterias 1 e 2 de ensaios.

Análise e tratamento dos dados

Os principais parâmetros analisados neste estudo foram as pressões médias e extremas mínimas com 1% e com 0,1% de probabilidade de não excedência, para as vazões e aberturas já indicadas anteriormente.

Os resultados experimentais foram tratados e analisados com o auxílio de planilhas e gráficos gerados nos softwares Excel e Sigmaplot a fim de ajustar equações e curvas que melhor descrevam a distribuição longitudinal das pressões a jusante da comporta.

Cabe salientar que a metodologia de análise desta pesquisa consistiu em utilizar os parâmetros adimensionais já propostos por Battiston (2013) e utilizados por Kempka (2014), que serão apresentados no item Resultados e Discussões.

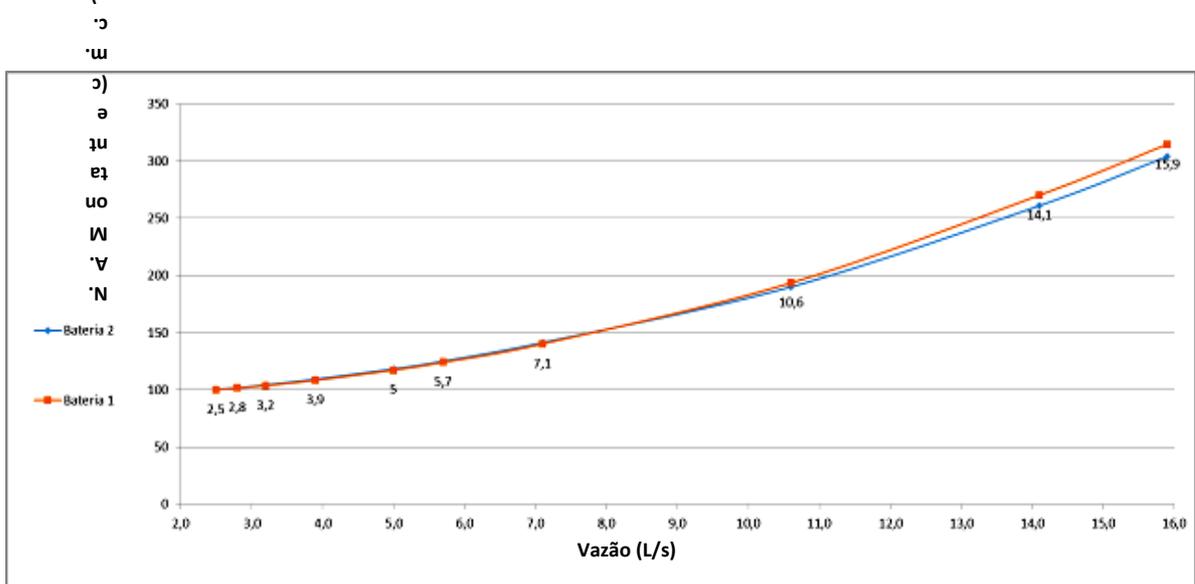


Figura 31 - Nível d'água na chaminé de equilíbrio: No eixo X estão as vazões (L/s) e no eixo Y as pressões (cm.c.a).

5 Resultados e Discussões

5.1 Pressões Médias Junto à Base e ao Teto do Conduto

Este item apresenta as discussões sobre os resultados obtidos através da análise dos dados coletados nos ensaios. Primeiramente é apresentado o comportamento das pressões e coeficientes médios junto a base e teto do aqueduto e logo após o comportamento das pressões mínimas para a probabilidade de 1% de não excedência junto a base e ao teto do aqueduto.

5.1.1 Pressões médias junto à base do aqueduto

Nesta etapa da pesquisa as pressões médias foram analisadas separadamente na base e no teto do aqueduto. De maneira geral pode-se se dizer que a conformação dos resultados obtidos em relação às pressões médias registradas tanto na base como no teto do aqueduto utilizado para as simulações experimentais, no intervalo que se dá logo a jusante da comporta até a região central do aqueduto, apresentaram variações em seu comportamento em função da vazão de ensaio e da abertura da comporta, conforme detalhamento dos gráficos abaixo.

Para a análise do comportamento da pressão média junto à base, os dados de carga de pressão são apresentados no eixo vertical com unidade de medida em metros de coluna d'água (m.c.a.) e os pontos de medição dos dados coletados são apresentados no eixo horizontal. Estes pontos no gráfico indicam a distância a partir da borda da comporta tipo segmento invertida até o ponto de medição e sua unidade de medida é dada em metros (m).

Na Figura 32 até a Figura 41 estão apresentados os comportamentos longitudinais das cargas de pressão médias na base do aqueduto, a jusante da comporta tipo segmento invertida, para as diferentes aberturas e vazões ensaiadas. A comporta está localizada no ponto 0 do eixo "X".

Através da análise da Figura 32 e da Figura 33 se pode perceber que imediatamente a jusante da comporta as pressões negativas são mínimas até

aproximadamente a posição 0,2m e a partir desta posição elas passam a crescer até a posição até a posição 0,6, onde se tornam praticamente constantes..

Pela análise da Figura 34 e da Figura 35 pode-se perceber que as pressões médias das vazões de 3,9L/s até 7,1L/s mantêm um comportamento praticamente constante com pressões positivas, porém as vazões maiores apresentam pressões mínimas imediatamente à jusante da comporta crescendo até a metade do aqueduto, próximo da posição 0,6m, e à medida que se afastam em direção ao final do aqueduto apresentam pressões maiores e positivas. A menor pressão média negativa coletada nos ensaios foi a pressão de $-0,665$ m.c.a. na abertura da comporta em 40% e vazão de 31,8L/s.

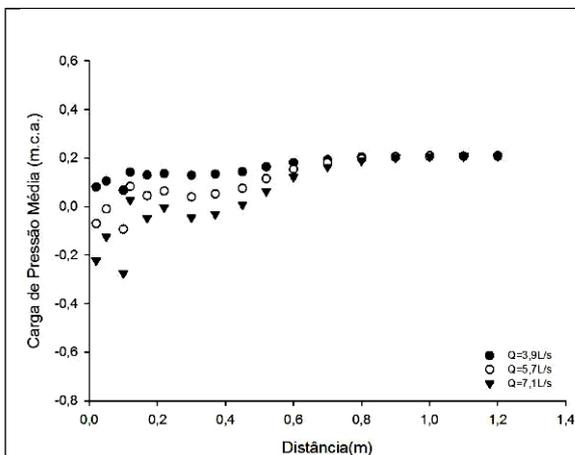


Figura 32 – Pressões médias na base (a=10%)

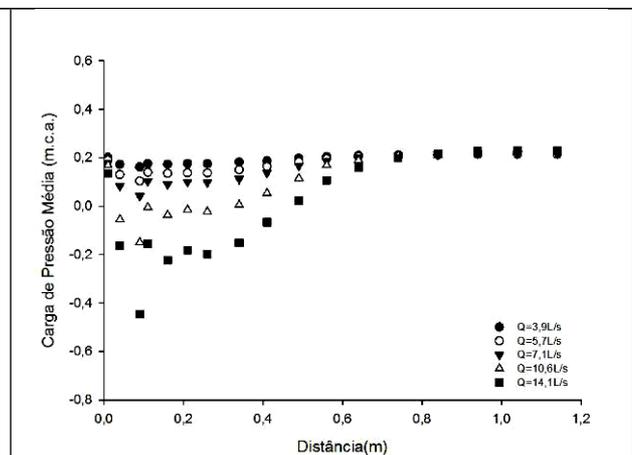


Figura 33 – Pressões médias na base (a=20%)

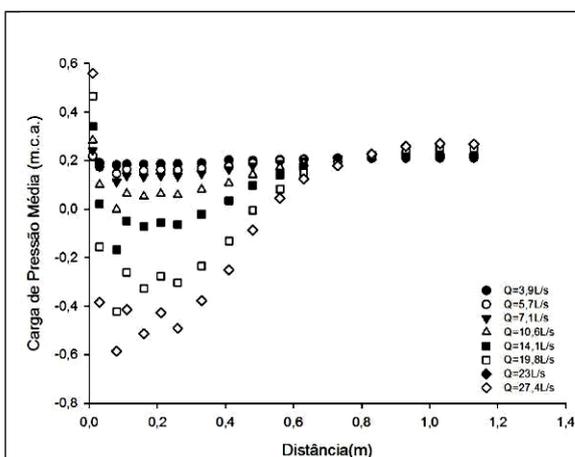


Figura 34 – Pressões médias na base (a=30%)

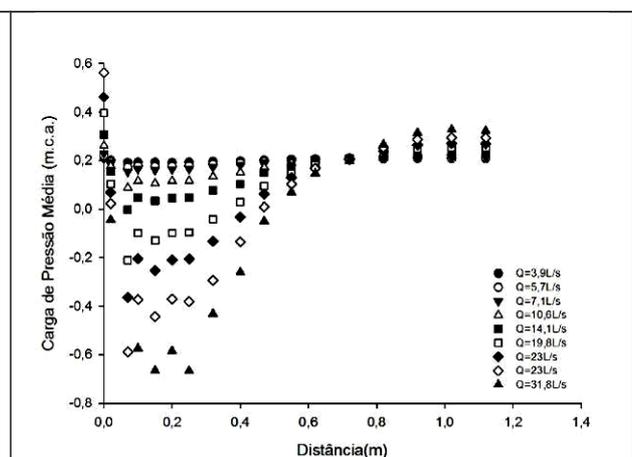


Figura 35 – Pressões médias na base (a=40%)

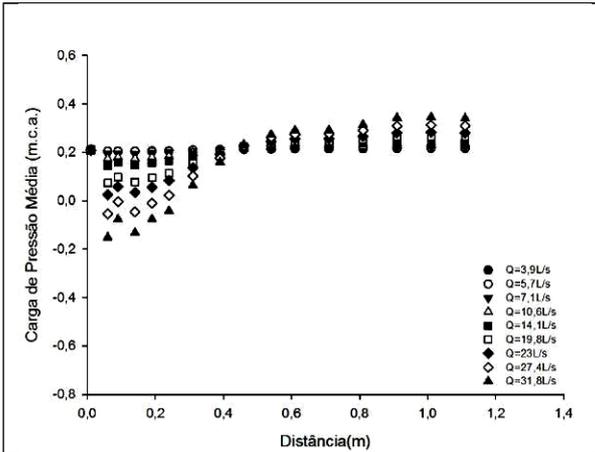


Figura 36 – Pressões médias na base (a=50%)

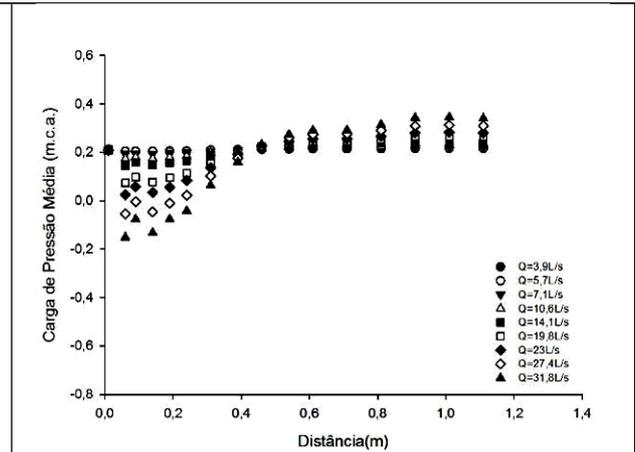


Figura 37 – Pressões médias na base (a=60%)

Analisando a Figura 36 e a Figura 37 pode-se perceber comportamento praticamente constante dos dados de pressões médias coletados nas vazões menores de 3,9L/s a 10,6L/s e já nas vazões maiores a partir de 14,1L/s existe um crescimento a partir das pressões mínimas. Nestas vazões maiores as pressões menores imediatamente a jusante da comporta crescem até próximo da posição 0,5m e à medida que se afastam em direção ao final do aqueduto tendem a pressões maiores e positivas.

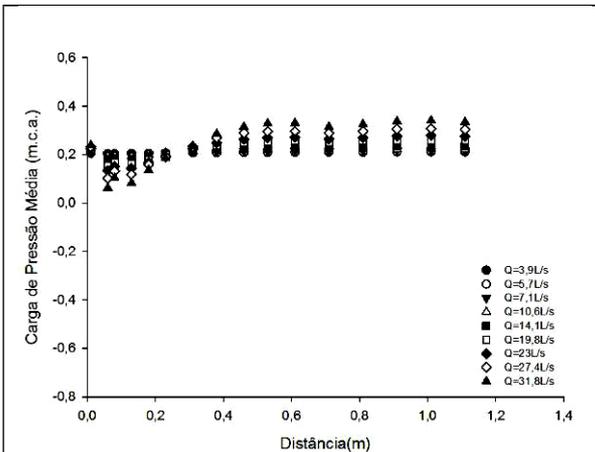


Figura 38 – Pressões médias na base (a=70%)

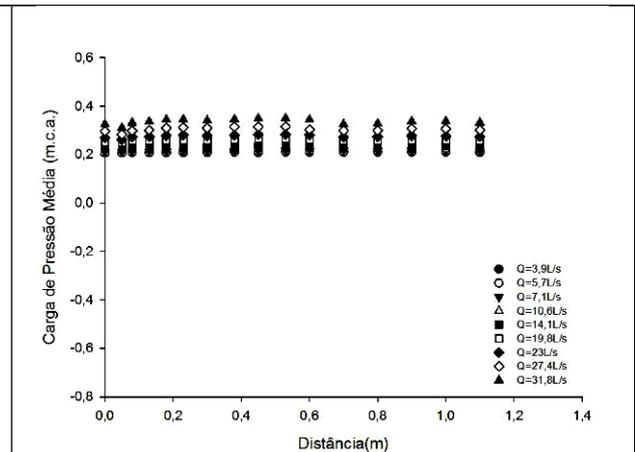


Figura 39 – Pressões médias na base (a=80%)

Através da análise da Figura 38 e da Figura 39 pode-se perceber que para o grau de abertura 70% existe comportamento praticamente constante das pressões médias coletados nas vazões de 3,9L/s a 14,1L/s. As vazões maiores apresentam pressões positivas menores imediatamente a jusante da comporta até a posição 0,2m e à medida que se afastam em direção ao final do aqueduto tendem a

estabilizar-se. Já para abertura de 80% existe uma oscilação muito pequena inicial e logo após na posição 0,2 as pressões apresentam comportamento constante.

Percebe-se através da análise da Figura 40 e da Figura 41 que existe uma tendência já imediatamente à jusante da comporta de um comportamento estável e linear das pressões médias, mantendo-se valores positivos. Logo pode-se concluir que quanto maior a abertura da comporta, maior também a estabilidade das pressões médias, com valores de pressão apresentados de forma linear, entre 0,2 m.c.a. e 0,3 m.c.a., devido a menor influência da comporta no escoamento.

De modo geral pode-se perceber que:

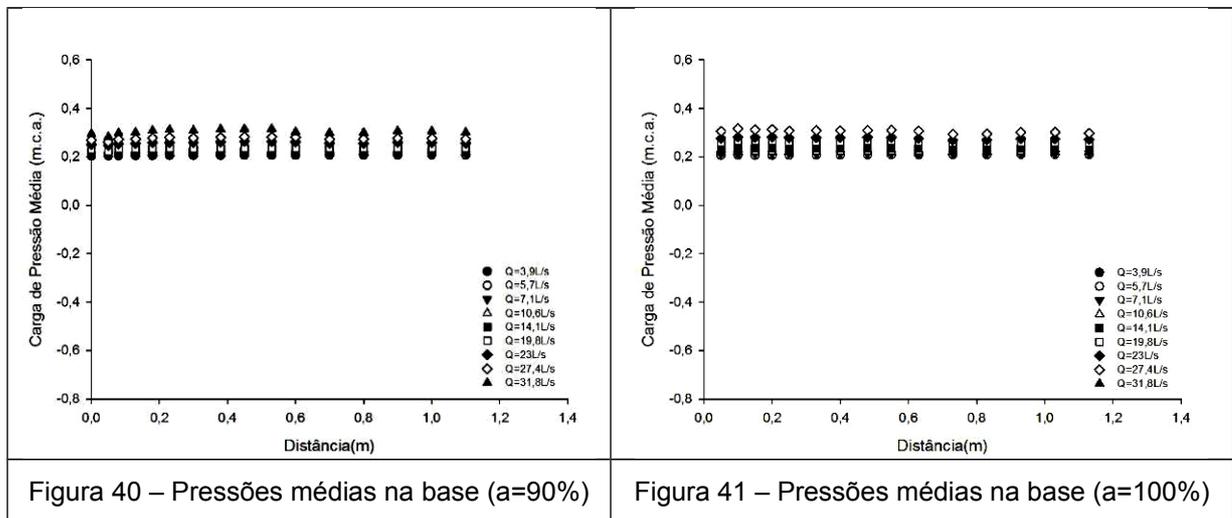


Figura 40 – Pressões médias na base (a=90%)

Figura 41 – Pressões médias na base (a=100%)

- as pressões médias registradas experimentalmente ao longo da base do aqueduto a jusante da comporta tipo segmento invertida apresentam-se de forma distinta em função da vazão e da abertura da comporta;
- em todas as aberturas, a tendência a pressões médias constantes se explica pelo fato de que, a partir de determinada posição no aqueduto, a comporta não exerce mais influência sobre o escoamento. Assim o nível d'água a jusante passa a ter influência predominante.
- as menores pressões médias, independente do grau de abertura, ocorrem imediatamente a jusante da comporta, justamente devido ao efeito do aumento de velocidade do escoamento em função da redução de seção transversal causada pela comporta, exceto na abertura de 100%, onde existe um comportamento estável já inicialmente, por não sofrer o efeito da redução de seção;

- d) a menor pressão média coletada nos ensaios foi a $-0,665\text{m.c.a.}$ na abertura da comporta em 40% e vazão de $31,8\text{L/s}$;
- e) quanto maior vazão, menores as pressões obtidas na região onde ocorrem as pressões mínimas, para um mesmo grau de abertura da comporta.

5.1.2 Pressões médias junto ao teto do aqueduto

Para a análise do comportamento da pressão média junto ao teto, os dados de pressão são apresentados da mesma forma que o comportamento da pressão média junto a base do aqueduto.

Na Figura 42 até Figura 51 estão apresentados os comportamentos das cargas de pressão médias no teto do aqueduto, a jusante da comporta tipo segmento invertida, para as diferentes aberturas e vazões ensaiadas.

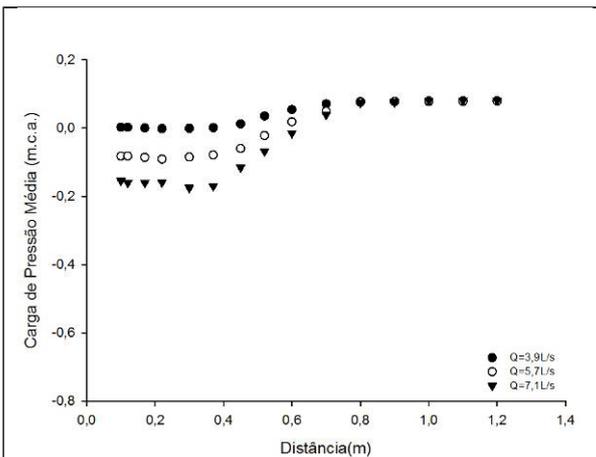


Figura 42 – Pressões médias no teto ($a=10\%$)

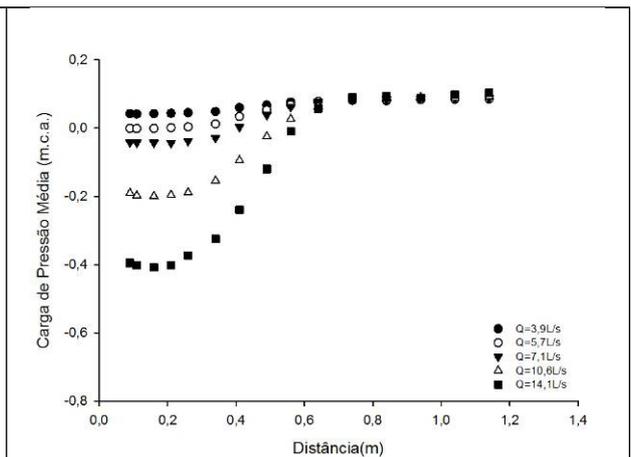


Figura 43 – Pressões médias no teto ($a=20\%$)

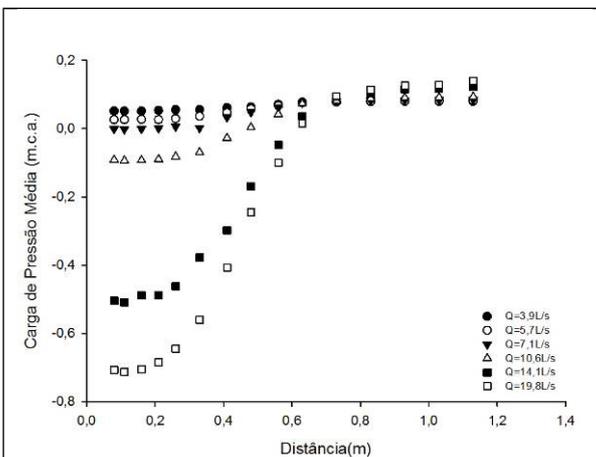


Figura 44 – Pressões médias no teto ($a=30\%$)

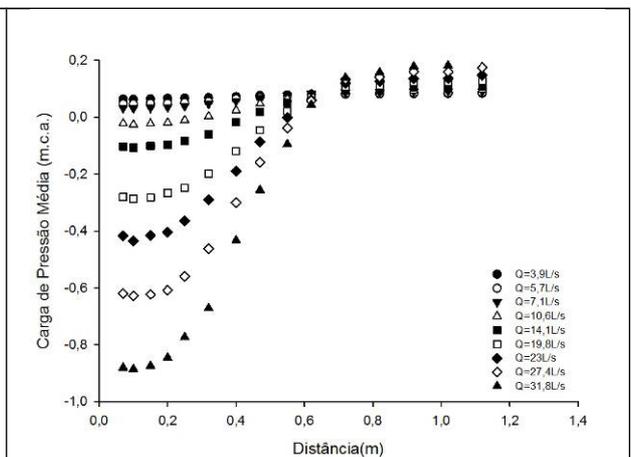


Figura 45 – Pressões médias no teto ($a=40\%$)

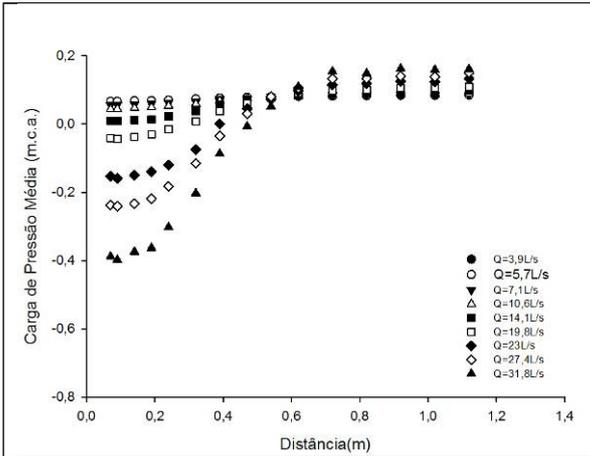


Figura 46 – Pressões médias no teto (a=50%)

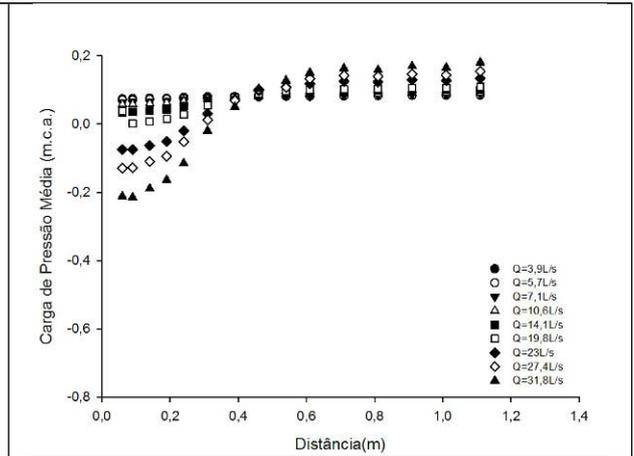


Figura 47 – Pressões médias no teto (a=60%)

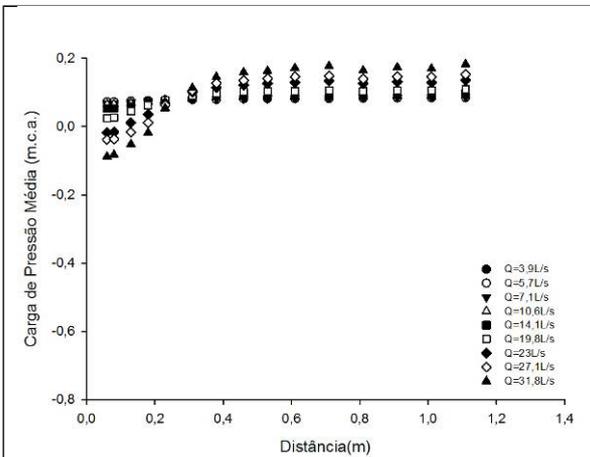


Figura 48 – Pressões médias no teto (a=70%)

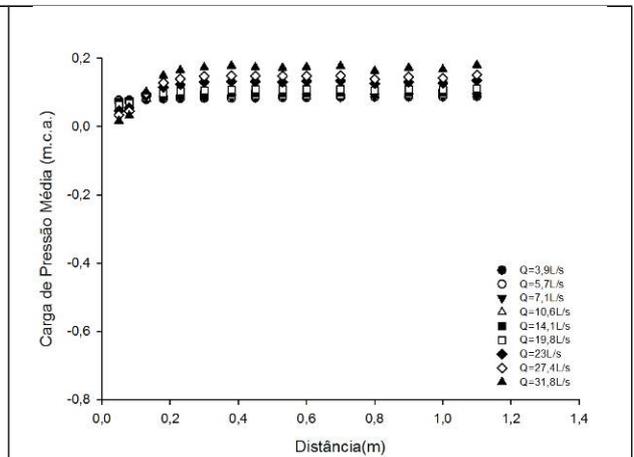


Figura 49 – Pressões médias no teto (a=80%)

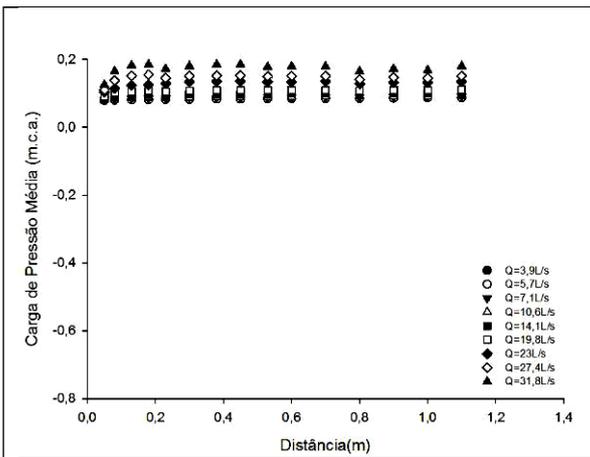


Figura 50 – Pressões médias no teto (a=90%)

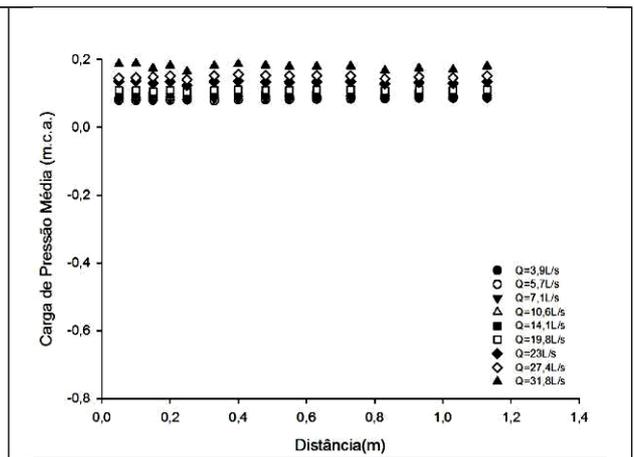


Figura 51 – Pressões médias no teto (a=100%)

Através da análise das figuras apresentadas, percebe-se que:

- a) as pressões médias registradas experimentalmente ao longo do teto do aqueduto se apresentam de forma distinta em função da vazão de ensaio e da abertura da comporta;
- b) existe um comportamento característico nas pressões do teto que coincide com o comportamento das pressões médias na base, quanto menor o grau de abertura da comporta, menores as pressões, na região das pressões mínimas e maior a distância da comporta para que ocorra a estabilização das pressões, para uma determinada vazão;
- c) a amplitude das pressões é maior nas aberturas de 30%, 40% e 50% e para as maiores vazões apresentadas;
- d) é possível perceber que a pressão média é diretamente proporcional à abertura da comporta, ou seja, se a abertura aumenta o valor da pressão média aumenta;
- e) a estabilização das pressões médias se dá mais próxima da comporta quanto maior for o grau de abertura da comporta;
- f) as pressões médias no teto do conduto perdem o efeito da abertura da comporta a partir de 0,50m a jusante da mesma até o grau de abertura de 40%. De 50% em diante perde o efeito da comporta após 0,3m; ;
- g) as pressões médias no teto do conduto mantem-se positivas em toda a região de ensaios a partir da abertura correspondente a 80%;
- h) as menores pressões médias. independente do grau de abertura, ocorrem imediatamente a jusante da comporta, tendo em vista que no teto do conduto se forma uma zona de recirculação;
- i) a menor pressão média encontrada foi de -0,885m.c.a na abertura de 40% com vazão de 31,8l/s na posição 0,1m a jusante da comporta;
- j) quanto maior vazão, menores as pressões obtidas, na região das onde ocorrem as pressões mínimas, para um mesmo grau de abertura da comporta;
- k) as pressões médias se estabilizam a medida que se afastam da comporta, pois diminui a influência da mesma sobre as pressões que passam a receber apenas a influência da carga hidráulica constante de jusante e assim sofrem apenas o efeito da perda de carga linear, tendendo a se igualar ao nível de jusante.

5.1.3 Pressão média: comparação base e teto para vazões iguais e aberturas diferentes

A Figura 52 até a Figura 61 mostram o comportamento das pressões para todas as aberturas mantendo a vazão constante. As vazões de 5,7L/s, 10,6L/s, 19,8L/s e 27,4L/s não constam nas figuras, pois seus comportamentos seguem a mesma tendência das vazões apresentadas, com valores de pressão intermediários entre as vazões imediatamente superior e inferior.

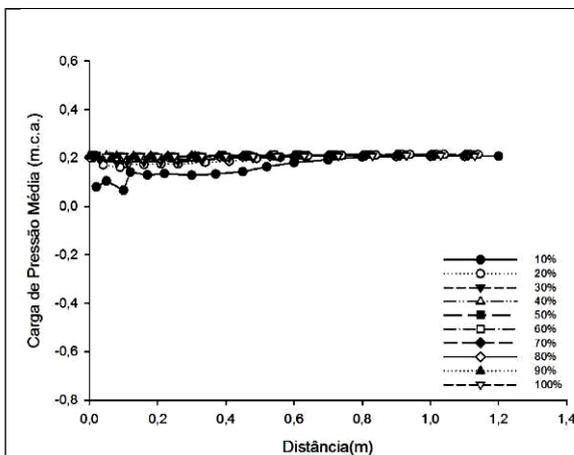


Figura 52 – Pressões médias na base (Q=3,9L/s)

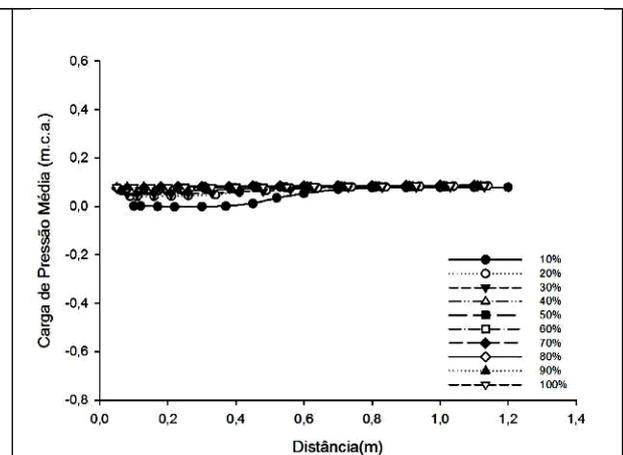


Figura 53 – Pressões médias no teto (Q=3,9L/s)

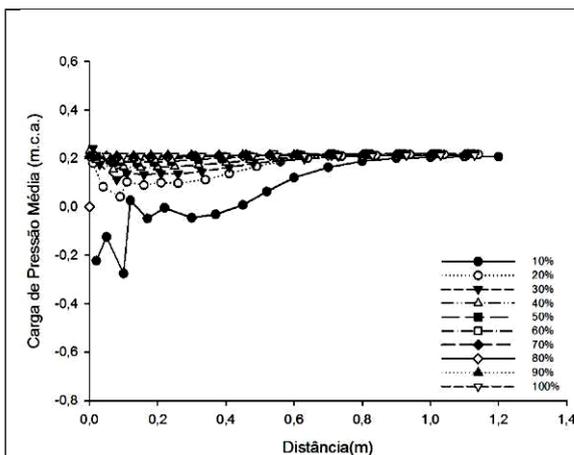


Figura 54 – Pressões médias na base (Q=7,1L/s)

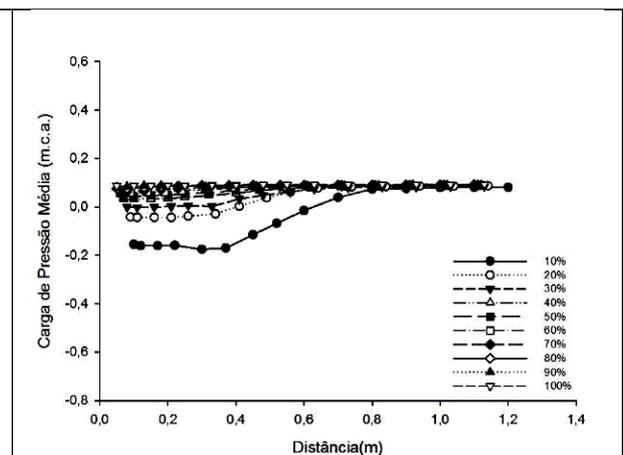


Figura 55 – Pressões médias no teto (Q=7,1L/s)

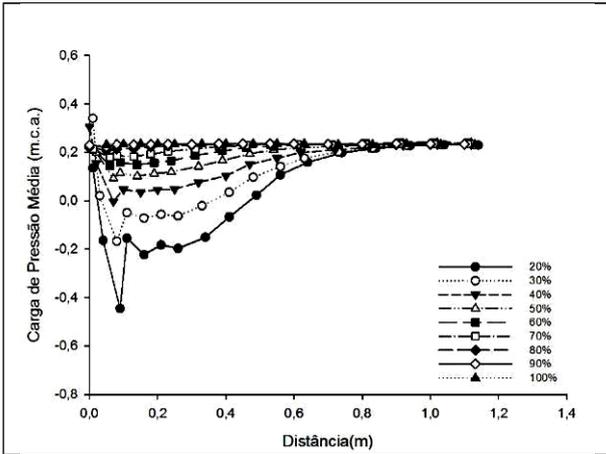


Figura 56 – Pressões médias na base ($Q=14,1\text{L/s}$)

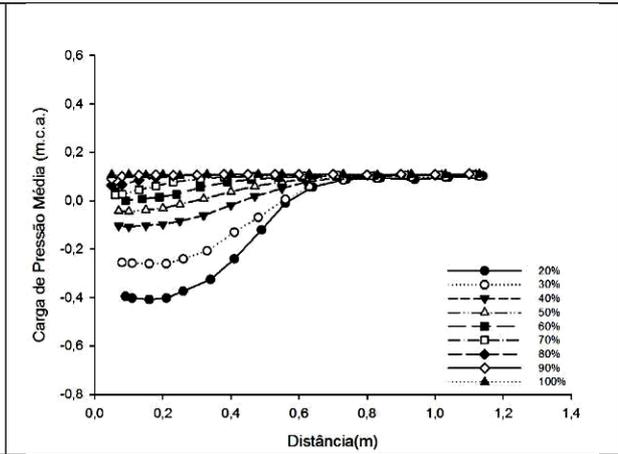


Figura 57 – Pressões médias no teto ($Q=14,1\text{L/s}$)

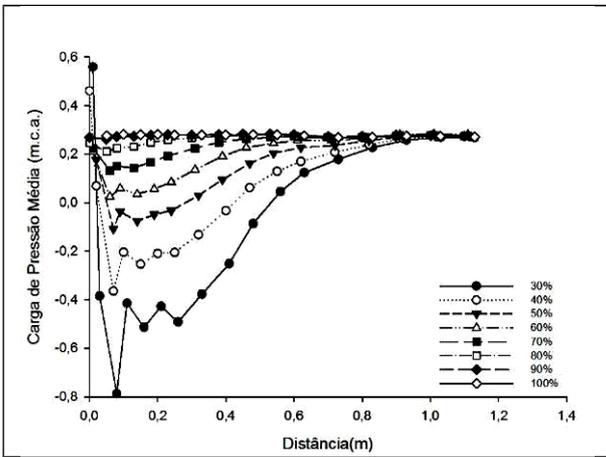


Figura 58 – Pressões médias na base ($Q=23,0\text{L/s}$)

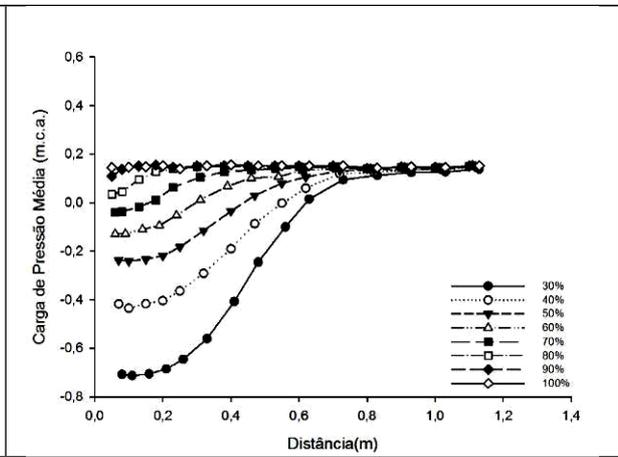


Figura 59 – Pressões médias no teto ($Q=23,0\text{L/s}$)

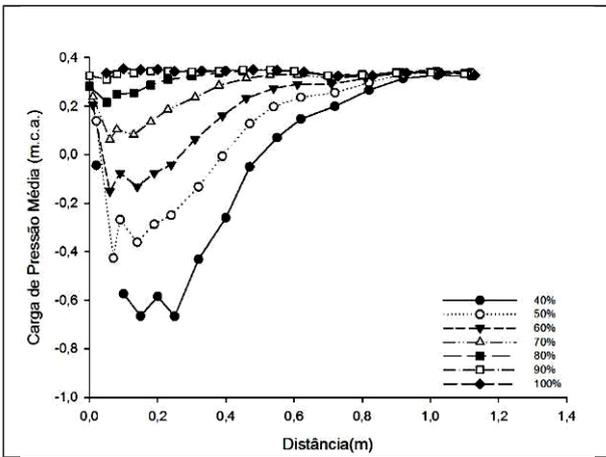


Figura 60 – Pressões médias na base ($Q=31,8\text{L/s}$)

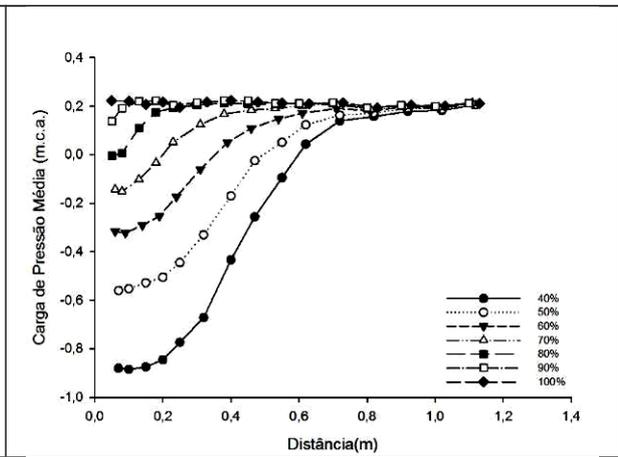


Figura 61 – Pressões médias no teto ($Q=31,8\text{L/s}$)

Pela análise das figuras apresentadas percebe-se que:

- a) a carga de pressão média para uma mesma vazão, sempre apresenta menor valor no teto em relação a base do aqueduto;
- b) para uma mesma vazão as pressões médias apresentam uma amplitude maior de acordo com a diminuição da abertura, ou seja quanto menor a abertura, maior é a amplitude do valor de pressão média, tanto na base como no teto;

As pressões médias imediatamente a jusante da comporta na região de recirculação são mais irregulares devido a grande turbulência gerada logo na saída da comporta na base;

5.1.4 Pressões médias mínimas na base e no teto

A Figura 62 e a Figura 63 apresenta as menores pressões encontradas durante os ensaios, tanto para a base quanto para o teto do aqueduto, onde faz-se a relação entre a carga de pressão em m.c.a. *versus* a vazão em L/s para cada uma das aberturas de comportas ensaiadas.

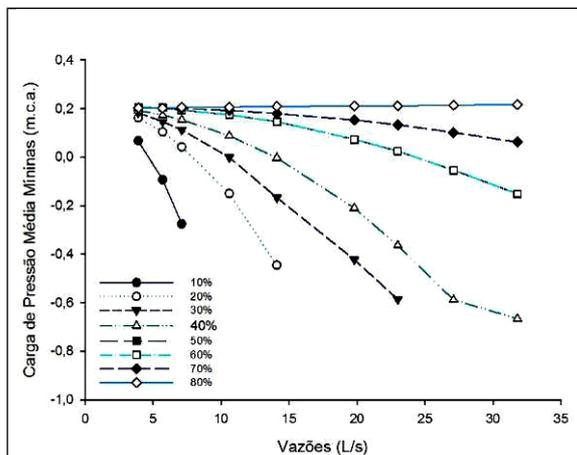


Figura 62 – Pressões médias mínimas na base

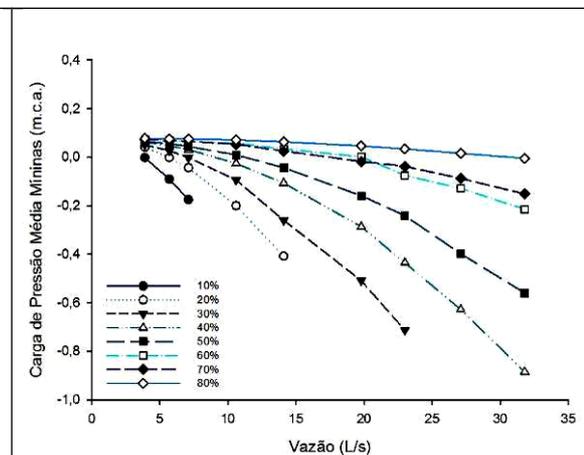


Figura 63 – Pressões médias mínimas no teto

A menor pressão média registrada nas simulações experimentais para a base foi $-0,665\text{m.c.a.}$ na abertura da comporta em 40% e vazão de $31,8\text{L/s}$, cabendo observar que a vazão de $31,8\text{L/s}$ para a abertura de 30% não pode ser ensaiada, pois ocorria o transbordamento da chaminé de equilíbrio. Para o teto, a menor pressão média registrada foi $-0,885\text{m.c.a.}$ na abertura de 40% com vazão de

31,8L/s. Pode-se observar, ainda, que para uma mesma vazão, quanto menor o grau de abertura da comporta menor a pressão média mínima registrada.

5.2 Coeficientes de Pressão Média Junto à Base e ao Teto do Aqueduto

A presente pesquisa tem como norteador os métodos de análise desenvolvidos por Battiston (2013) e também por Kempka (2014). Então conforme indica Battiston (2013) os dados de pressão e posição longitudinal foram adimensionalizados conforme apresentado a seguir, o que foi também realizado com os dados experimentais deste pesquisa.

O L_{adm} foi calculado através da distância entre o ponto de medição e a borda da comporta (L_i) que foi dividida pela diferença entre a altura total do aqueduto (D) e a altura de abertura da comporta (a), conforme equação 11.

$$L_{adm} = \frac{L_i}{D - a} \quad (11)$$

O CP_{adm} , que é o coeficiente de pressão adimensional, foi calculado através de subtração da carga de pressão no ponto de ensaio (\bar{P}/γ) pela carga de pressão de referência ($\bar{P}_{a100\%}/\gamma$) que é a carga de pressão na mesma condição (ponto e vazão), porém com abertura de 100% da comporta. O valor encontrado nesta diferença foi adimensionalizado pela diferença das cargas cinéticas calculadas na posição abaixo da comporta e a montante da mesma, conforme equação 12.

$$CP_{adm} = \frac{\bar{P}/\gamma - \bar{P}_{a100\%}/\gamma}{\frac{V_a^2 - V^2}{2g}} \quad (12)$$

Tendo em vista que os adimensionais propostos por Battiston (2013) tem validade para escoamentos com número de Reynolds superiores a $3 \cdot 10^5$, apresenta-se, na Figura 64, a linha em amarelo que mostra o limite inferior indicado por Battiston (2013) e a linha vermelha que mostra o limite inferior de $1 \cdot 10^5$ encontrado na presente pesquisa. A figura apresenta as vazões ensaiadas no modelo físico e o

respectivo número de Reynolds do escoamento, de forma a possibilitar a indicação de quais vazões estariam contidas nesta faixa de domínio dos adimensionais.

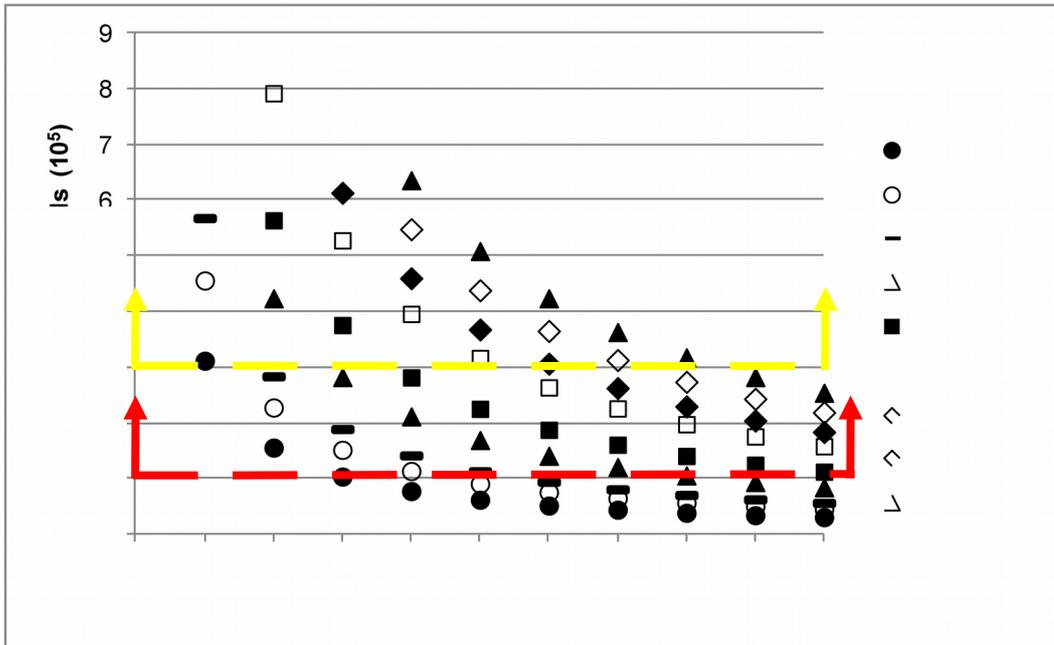


Figura 64 – Número de Reynolds para cada condição de ensaio

Através da análise da figura 64 pode-se perceber que quanto menor a vazão para os graus de abertura de comporta maiores, menor o Número de Reynolds encontrado. Sendo que acima de 40% de abertura de comporta já se tem valores de Reynolds menores do que $1 \cdot 10^5$, portanto fora do limite de análise nesta pesquisa, conforme mostra a linha vermelha.

5.2.1 Coeficiente de pressão média junto à base do aqueduto

A Figura 65 até a Figura 72 apresentam a relação entre os adimensionais L_{adm} e CP_{adm} para cada grau de abertura da comporta e a comparação com as equações propostas por Battiston (2013) e Kempka (2014) para a base do aqueduto.

Após a análise das figuras observa-se que:

- os valores de CP_{adm} tem sua amplitude diretamente proporcional ao grau de abertura da comporta, uma vez que quanto maior a abertura maior a amplitude do CP_{adm} ;

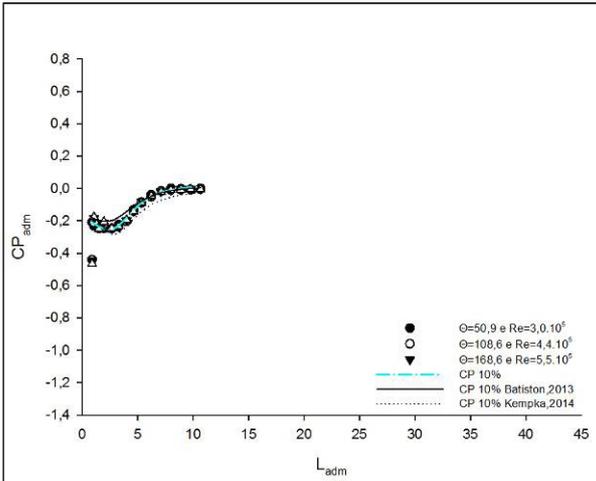


Figura 65 – CP_{adm} médio para a base ($a=10\%$)

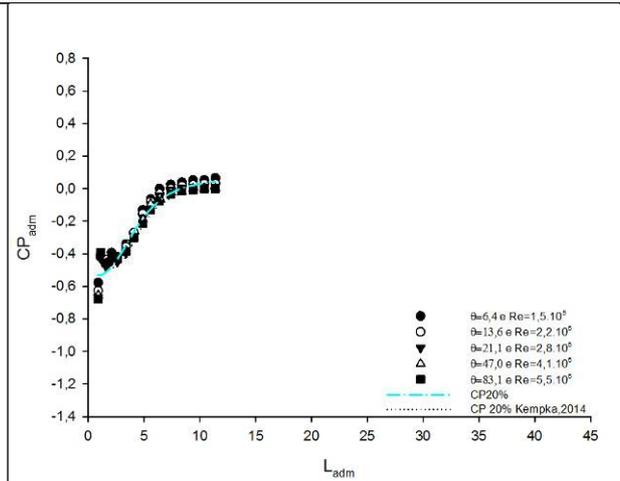


Figura 66 – CP_{adm} médio para a base ($a=20\%$)

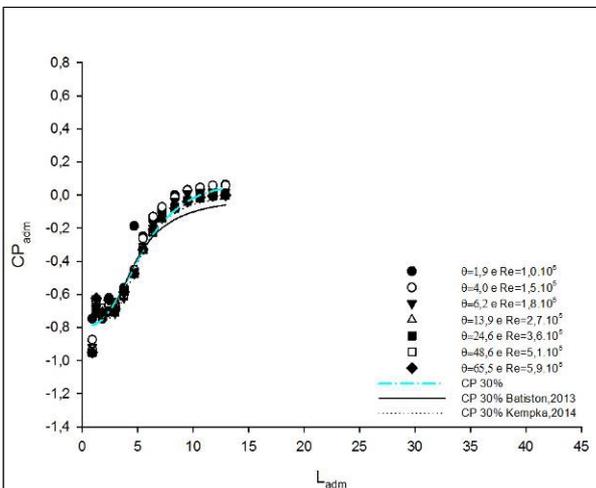


Figura 67 – CP_{adm} médio para a base ($a=30\%$)

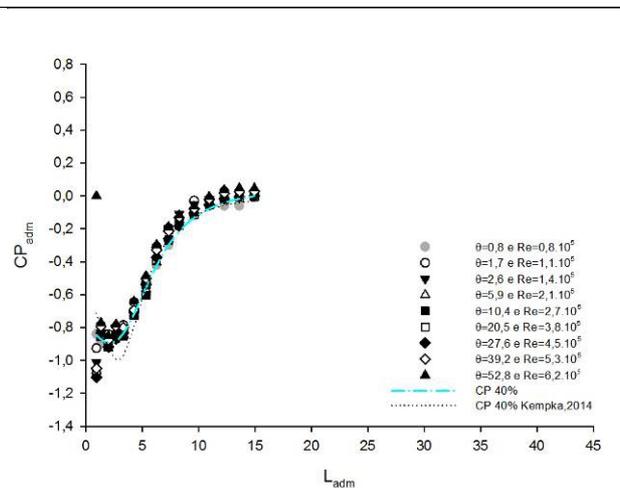


Figura 68 – CP_{adm} médio para a base ($a=40\%$)

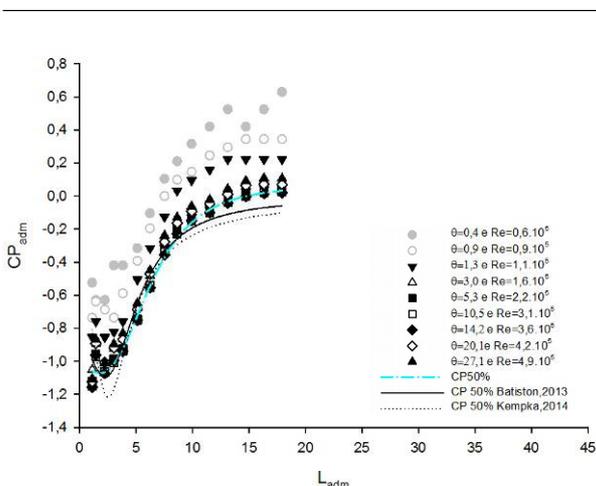


Figura 69 – CP_{adm} médio para a base ($a=50\%$)

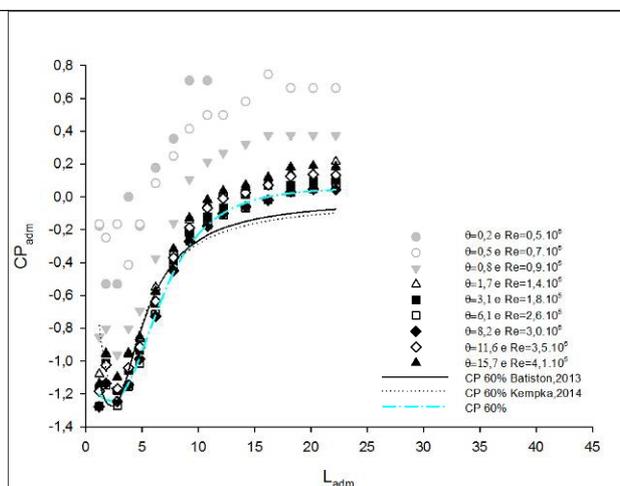


Figura 70 – CP_{adm} médio para a base ($a=60\%$)

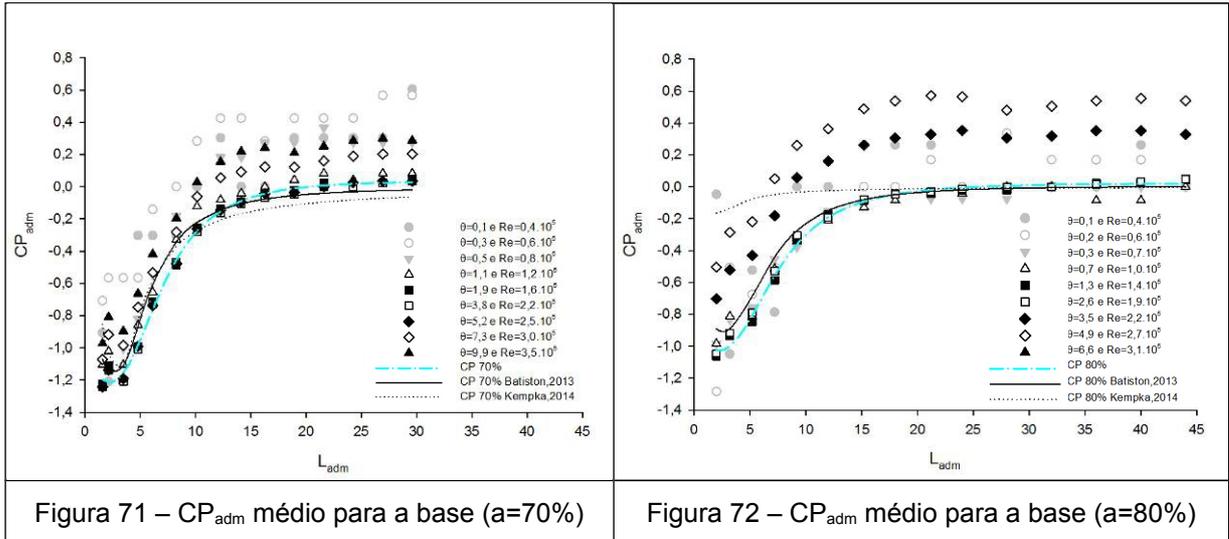


Figura 71 – CP_{adm} médio para a base ($a=70\%$)

Figura 72 – CP_{adm} médio para a base ($a=80\%$)

- b) o menor CP_{adm} encontrado foi -1,277 na posição adimensional aproximada de 1,5 na abertura de 60%, porém, a menor pressão média ocorreu para a abertura da comporta de 40% o que pode ser reforçado pelas pesquisas de Palauro (2012) e Battiston (2013). Palauro (2012) também obteve para seus ensaios em regime permanente, a menor pressão média na abertura de 30% e no regime transitório obteve a menor pressão média para abertura de 40%. Battiston (2013) encontrou o menor valor de CP_{adm} para base do aqueduto na abertura de 60%. Kempka (2014) já havia observado o fato de o menor CP_{adm} e a menor pressão média não se apresentarem na mesma abertura de comporta. No caso de Kempka (2014) o menor CP_{adm} se deu na abertura de 50% e a menor pressão média na abertura de 40%, ou seja, o fato sugere que a análise somente do coeficiente CP_{adm} não é suficiente para indicar em que abertura e vazão ocorre a pressão mais crítica. A análise destes resultados indica que a fase crítica das pressões na base do aqueduto encontra-se entre as aberturas da comporta de 30% e 60%;
- c) de modo geral pode-se visualizar que os menores valores de CP_{adm} encontram-se entre as posições adimensionais de 1 e 5;
- d) para as aberturas de 50 e 60% o ajuste da presente pesquisa, a partir da posição adimensional 10 ficou um pouco acima das pesquisas de Kempka (2014) e Battiston (2013).
- e) as curvas de ajuste encontradas nesta pesquisa são comparadas em todos os gráficos com as pesquisas de Battiston (2013) e de

Kempka (2014), e as curvas de ajuste das três pesquisas apresentam coerência, porém para as pressões flutuantes $P_{0,1\%}$ e $P_{1\%}$ não obtiveram um ajuste tão próximo ao ajuste apresentado pelos outros autores. Acredita-se que este fato se deu, devido a escala maior utilizada neste estudo;

- f) as vazões de 5,7 e 7,1L/s para o grau de abertura 50 e 60% e as vazões de 5,7, 7,1 e 10,6L/s, para grau de abertura de 70 e 80% estão fora da tendência geral de ajuste, pois apresentam número de Reynolds menor do que 1.10^5 , limite para os ajustes de equação desta pesquisa. Este valor limite de Reynolds é inferior ao apresentado por Battiston (2013) que era de 3.10^5 .

A Figura 73 mostra todas as curvas ajustadas para cada abertura de comporta de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. A abertura de 90% não é apresentada, pois tem suas pressões muito próximas da abertura da comporta de referência de 100% que é apresentada separadamente ao final desta pesquisa.

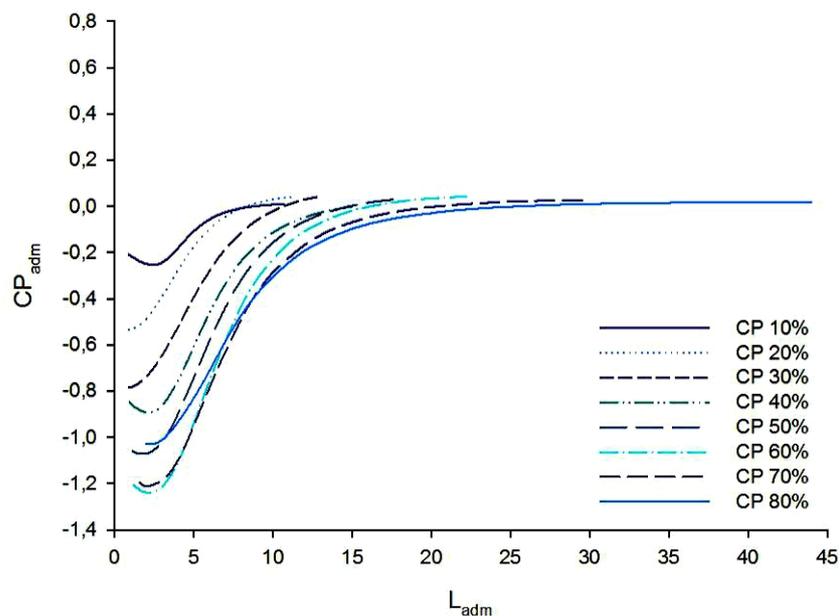


Figura 73 – Comportamento longitudinal do CP_{adm} médio para a base do aqueduto.

As curvas ajustadas para a base do aqueduto são representadas pela função racional de 4 parâmetros descrita pela Equação 13 e os coeficientes (a, b, c, d)

encontrados na presente pesquisa estão apresentados na Tabela 5, juntamente com os coeficientes propostos por Battiston (2013) e Kempka (2014).

$$CP_{adm} = \frac{a + b \cdot L_{adm}}{1 + c \cdot L_{adm} + d \cdot L_{adm}^2} \quad (13)$$

Tabela 5 - Comparação entre os CP_{adm} médios na base do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).

Abertura da comporta	Referência	Coeficiente				R ²
		a	b	c	d	
10%	Presente Pesquisa	-0,1700	0,0193	-0,3519	0,0575	0,99
	Battiston (2013)	-0,1537	0,01558	-0,3097	0,05477	0,98
	Kempka (2014)	-1,2880	0,0151	-0,3859	0,0665	0,96
20%	Presente Pesquisa	-0,5219	0,0625	-0,1823	0,0443	0,95
	Kempka (2014)	-0,3372	0,0315	-0,3378	0,0608	0,95
30%	Presente Pesquisa	-0,7805	0,0732	-0,1248	0,0269	0,98
	Battiston (2013)	-0,5576	-0,0027	-0,2705	0,07424	0,95
	Kempka (2014)	-0,4857	0,0272	-0,3202	0,0581	0,96
40%	Presente Pesquisa	-0,7656	0,0505	-0,1922	0,0321	0,99
	Kempka (2014)	-0,5383	0,0179	-0,3427	0,0573	0,96
50%	Presente Pesquisa	-0,9847	0,0664	-0,1541	0,0259	0,98
	Battiston (2013)	-0,7534	-0,011	-0,2687	0,06189	0,97
	Kempka (2014)	-0,3663	-0,1396	-0,4356	0,1083	0,97
60%	Presente Pesquisa	-1,0928	0,0675	-0,1632	0,0247	0,99
	Battiston (2013)	-0,7545	-0,0754	-0,2969	0,07663	0,95
	Kempka (2014)	-0,2895	-0,1816	-0,4199	0,1059	0,97
70%	Presente Pesquisa	-1,0624	0,0520	-0,1519	0,0241	0,99
	Battiston (2013)	-0,752	0,00007	-0,264	0,04931	0,99
	Kempka (2014)	-0,2897	-0,1358	-0,396	0,0887	0,98
80%	Presente Pesquisa	-0,9216	0,0361	-0,1291	0,0214	0,99
	Battiston (2013)	-0,7142	0,01765	-0,1826	0,03169	0,96
	Kempka (2014)	-0,0556	-0,0328	-0,4519	0,1587	0,97

5.2.2 Coeficiente de pressão média junto ao teto do conduto

Da Figura 74 até a Figura 81 estão apresentadas as relações entre os adimensionais L_{adm} e CP_{adm} no teto do conduto para cada grau de abertura da comporta e a comparação com as propostas de Battiston (2013) e Kempka (2014).

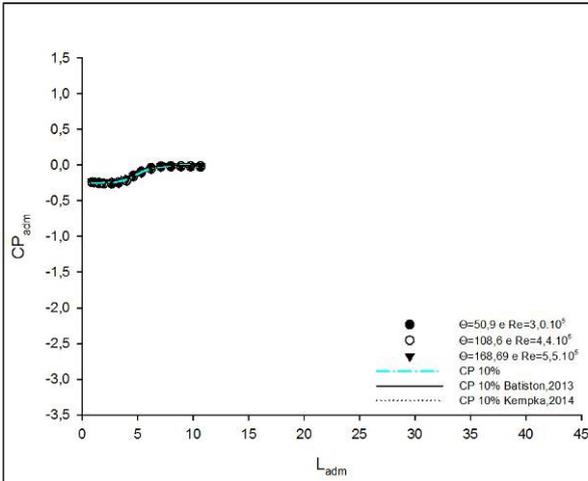


Figura 74 – CP_{adm} médio para o teto ($a=10\%$)

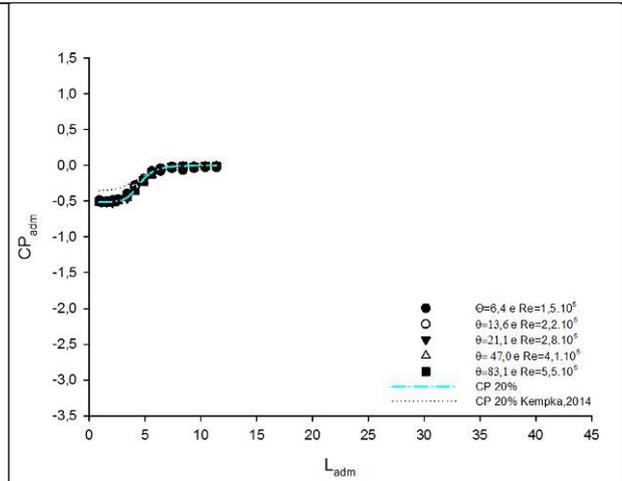


Figura 75 – CP_{adm} médio para o teto ($a=20\%$)

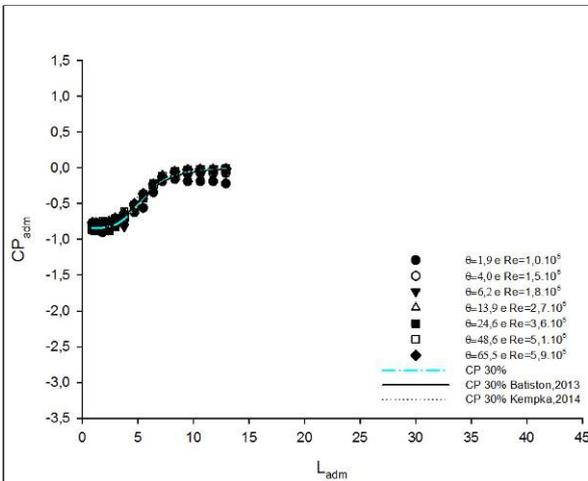


Figura 76 – CP_{adm} médio para o teto ($a=30\%$)

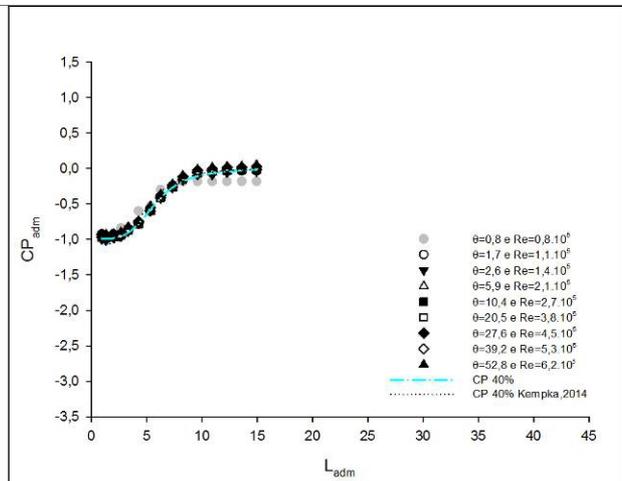


Figura 77 – CP_{adm} médio para o teto ($a=40\%$)

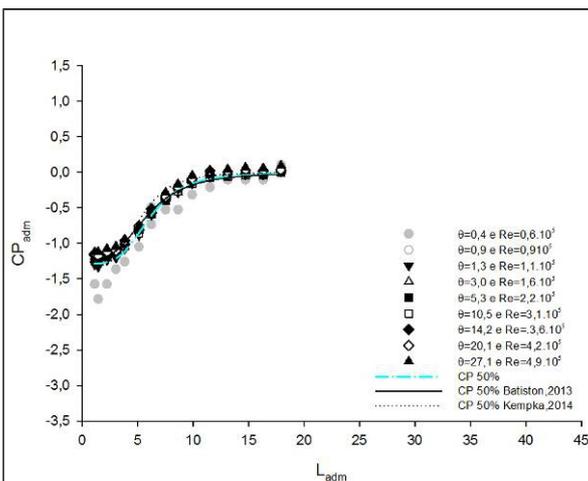


Figura 78 – CP_{adm} médio para o teto ($a=50\%$)

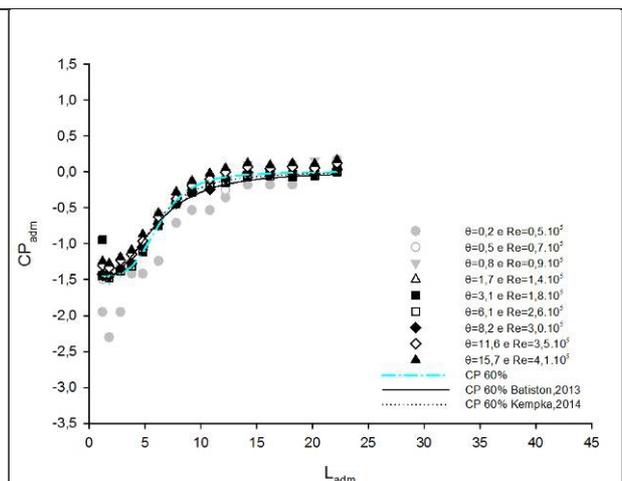


Figura 79 – CP_{adm} médio para o teto ($a=60\%$)

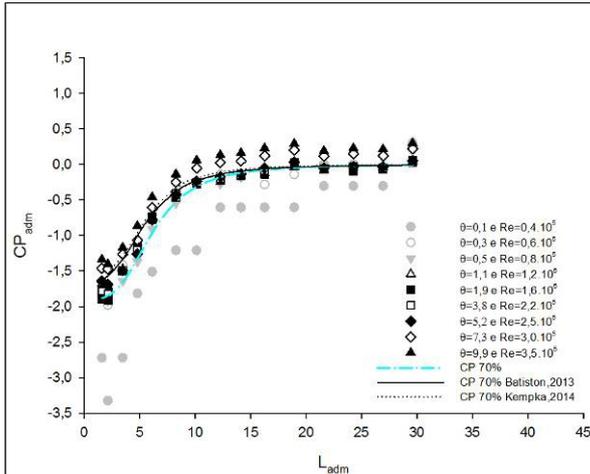


Figura 80 – CP_{adm} médio para o teto ($a=70\%$)

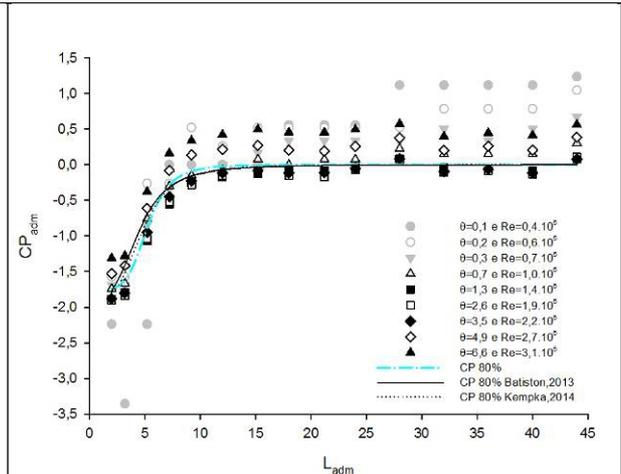


Figura 81 – CP_{adm} médio para o teto ($a=80\%$)

Após a análise das figuras apresentadas, observa-se que:

- os coeficientes de pressão média no teto do conduto tenderam a apresentar valores que aumentam conforme aumenta a distância da comporta tendendo a estabilização e os CP_{adm} mínimos diminuíram conforme aumentou o grau de abertura da comporta;
- os valores de CP_{adm} tem sua amplitude diretamente proporcional ao grau de abertura da comporta, uma vez que quanto maior a abertura maior a amplitude do CP_{adm} ;
- o menor CP_{adm} encontrado foi -1,981 na posição adimensional aproximada de 1,5 na abertura de 70%, porém, a menor pressão média ocorreu para a abertura da comporta de 40% o que reforça os resultados de Kempka (2014) que já havia observado o fato de o menor CP_{adm} e a menor pressão média não se apresentarem na mesma abertura de comporta. No caso de Kempka (2014) para análise do teto do aqueduto o menor CP_{adm} se deu na abertura de 80% e a menor pressão média na abertura de 30%, ou seja, o fato sugere que a análise somente do coeficiente CP_{adm} não é suficiente para indicar em que abertura e vazão ocorre a pressão mais crítica no caso das pressões médias;
- os menores valores de CP_{adm} encontram-se no primeiro ponto de medição a jusante da comporta, próximo à posição adimensional 1,0;
- as curvas de ajuste encontradas nesta pesquisa são comparadas em todos os gráficos com as pesquisas de Battiston (2013) e Kempka (2014) e

para todos os graus de abertura da comporta, as curvas de ajuste das três pesquisas apresentam coerência;

- f) principalmente para as vazões de 27,4L/s e 31,8L/s para as aberturas de 70 e 80%, a dispersão dos dados se deu em uma magnitude, onde não foi possível definir um padrão de comportamento e identificar um número de Reynolds limite para o qual os valores de CP_{adm} no teto destoam da tendência geral.

A Figura 82 mostra todas as curvas ajustadas para cada abertura de comporta de 10%, 20%,30%,40%,50%,60%,70% e 80% no teto. A abertura de 90% não é apresentada, pois tem suas pressões muito próximas da abertura da comporta de referência em 100%, que é apresentada separadamente ao final desta pesquisa.

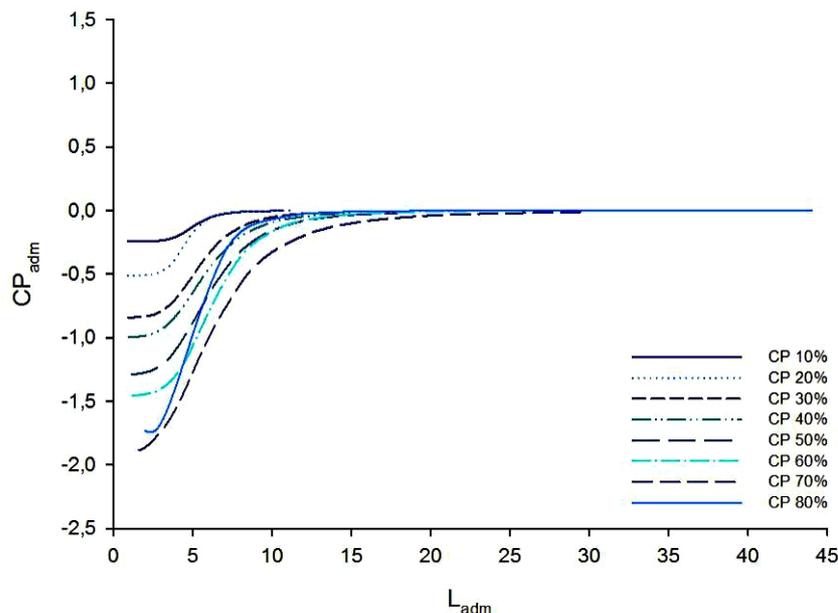


Figura 82 – Comportamento longitudinal do CP_{adm} médio para o teto do aqueduto.

As curvas ajustadas para o teto do aqueduto são representadas pela função racional de 3 parâmetros descrita pela equação 14 e os coeficientes (a, b, c) encontrados na presente pesquisa estão apresentados na Tabela 6, juntamente com os coeficientes propostos por Battiston (2013) e Kempka (2014).

$$CP_{adm} = \frac{1}{a + b \cdot L_{adm}^c} \quad (114)$$

Tabela 6 - Comparação entre os CP_{adm} médios no teto do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).

Abertura da Comporta	Referência	Coeficientes			R^2
		a	b	c	
10%	Presente Pesquisa	-4,1345	-6,934E-05	6,7728	0,99
	Battiston (2013)	-4,3920	-0,00014	6,73315	0,99
	Kempka (2014)	-4,5500	-0,0022	5,2422	0,99
20%	Presente Pesquisa	-1,9582	-5,935E-05	6,8787	0,99
	Kempka (2014)	-2,8496	-0,006	4,0225	0,98
30%	Presente Pesquisa	-1,1885	-0,0004864	4,5729	0,98
	Battiston (2013)	-1,26092	-0,0008	4,28624	0,97
	Kempka (2014)	-1,2311	-0,0026	3,8491	0,99
40%	Presente Pesquisa	-1,0038	-0,0006845	4,1553	0,99
	Kempka (2014)	-0,9309	-0,0015	3,946	0,97
50%	Presente Pesquisa	-0,7753	-0,0005939	3,9797	0,99
	Battiston (2013)	-0,81084	-0,00231	3,32734	0,98
	Kempka (2014)	-0,7546	-0,0009	4,0756	0,97
60%	Presente Pesquisa	-0,6877	-0,0001867	4,4723	0,98
	Battiston (2013)	-0,65331	-0,00482	2,7837	0,97
	Kempka (2014)	-0,676	-0,0021	3,2731	0,98
70%	Presente Pesquisa	-0,5252	-0,0013095	3,2877	0,99
	Battiston (2013)	-0,60448	-0,00337	3,03151	0,96
	Kempka (2014)	-0,6397	-0,0023	3,2875	0,99
80%	Presente Pesquisa	-0,5728	-0,0001094	5,1633	0,80
	Battiston (2013)	-0,5238	-0,00422	3,26083	0,97
	Kempka (2014)	-0,5339	-0,0017	3,6843	0,99

5.2.3 Coeficiente de pressão média adimensional mínimo na base e no teto

Na Figura 83 e na Figura 84 são apresentados os valores mínimos do CP_{adm} registrados nesta pesquisa e comparados com aqueles apontados por Battiston (2013) e Kempka (2014).

No caso da base do aqueduto os CP_{adm} médios mínimos da presente pesquisa estão menores em relação àqueles das pesquisas citados, mas em concordância geral, uma vez que todos os três estudos indicam redução até as aberturas de 40% a 60% com posterior aumento. O CP_{adm} médio mínimo da presente pesquisa foi encontrado na abertura da comporta de 60% o que coincide com os resultados de Battiston (2013) que se deu também na abertura de 60%. Kempka (2014) teve o menor CP_{adm} médio registrado na abertura de 50%.

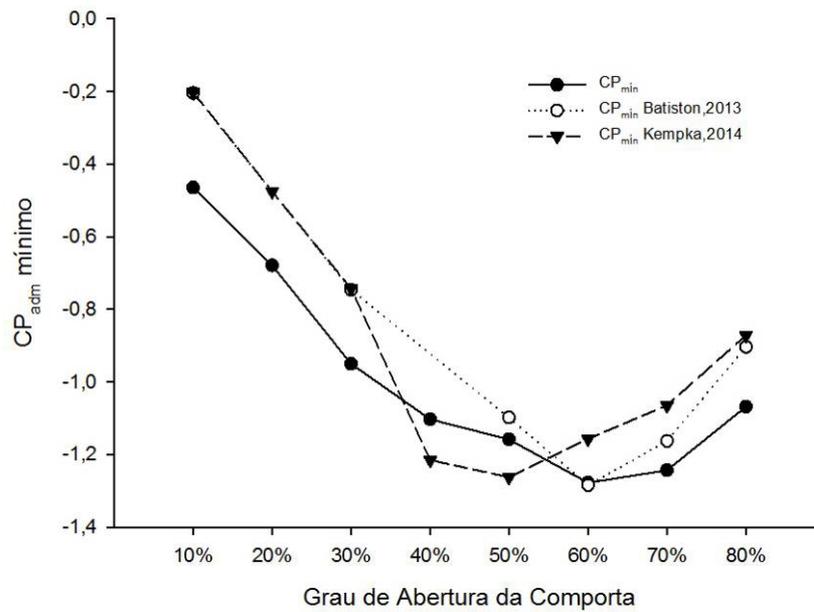


Figura 83 – CP_{adm} médio mínimo na base do conduto.

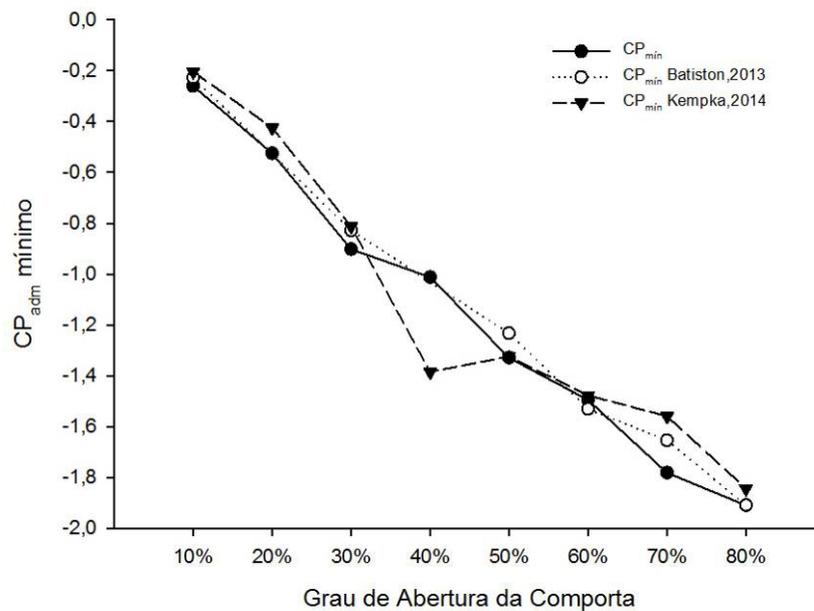


Figura 84 – CP_{adm} médio mínimo no teto do conduto.

No caso do teto, o CP_{adm} médio mínimo tende a diminuir seu valor à medida que aumenta a abertura da comporta, logo recomenda-se atenção redobrada quanto as pressões médias mínimas, pois estas tendem a diminuir assim como o valor do CP_{adm} . Na comparação com as pesquisas de Battiston (2013) e Kempka (2014) percebe-se boa concordância dos resultados.

5.3 Comportamento das Pressões Mínimas P1% e P0,1%

A caracterização das pressões mínimas junto à base e ao teto do aqueduto a jusante da comporta são imprescindíveis para a identificação dos picos inferiores de pressão, que mesmo em um curto período de tempo podem atingir a estrutura. Logo o estudo das pressões com probabilidade de ocorrerem em um tempo inferior a 1% e a 0,1% é importante para a manutenção e a garantia da vida útil da estrutura, uma vez que mesmo em curtos períodos de tempo, eventuais danos podem produzir irregularidades no concreto e desencadear processos erosivos mais graves. Então, o estudo do comportamento das pressões mínimas com probabilidade de não excedência de 1% e 0,1% torna mais segura a análise quanto aos riscos de erosão, cavitação e danos a estrutura em geral.

5.3.1 Pressões com 1% de probabilidade de não excedência ($P_{1\%}$)

Estão apresentados, da Figura 85 até a Figura 92 as cargas de pressão com probabilidade de não excedência de 1% ($P_{1\%}$) para a base do aqueduto em relação à distância da comporta segmento invertida.

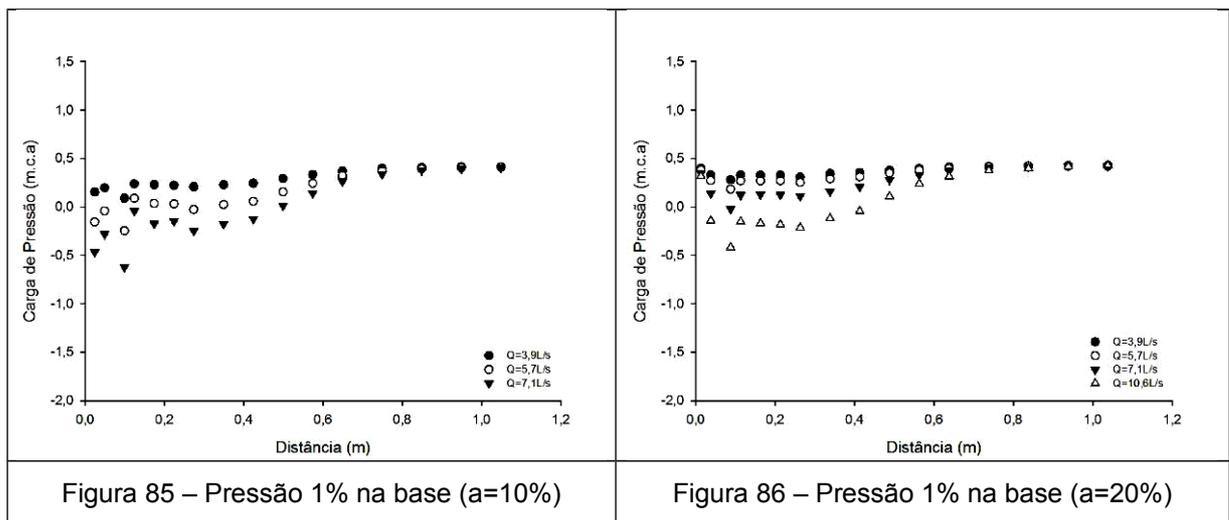


Figura 85 – Pressão 1% na base (a=10%)

Figura 86 – Pressão 1% na base (a=20%)

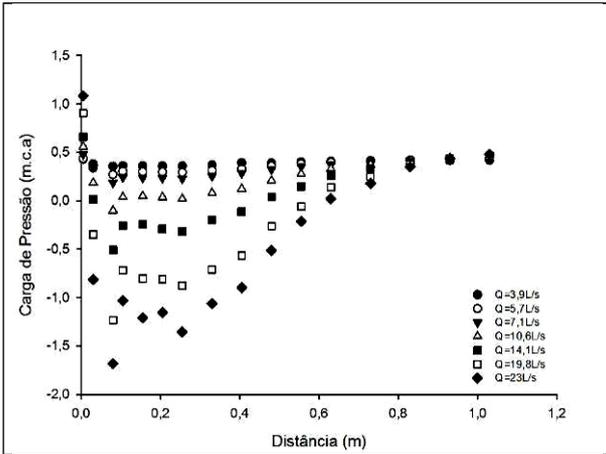


Figura 87 – Pressão 1% na base (a=30%)

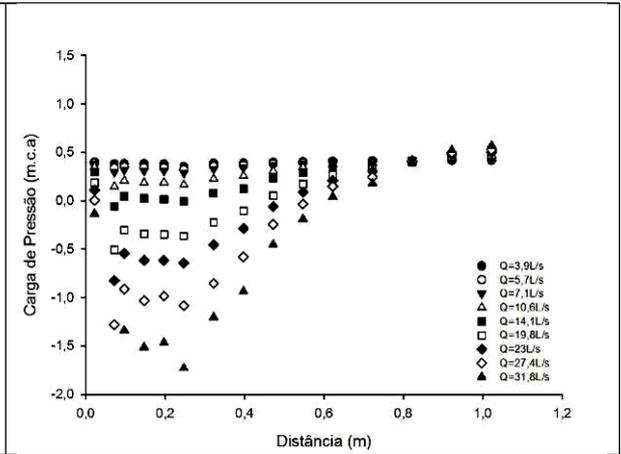


Figura 88 – Pressão 1% na base (a=40%)

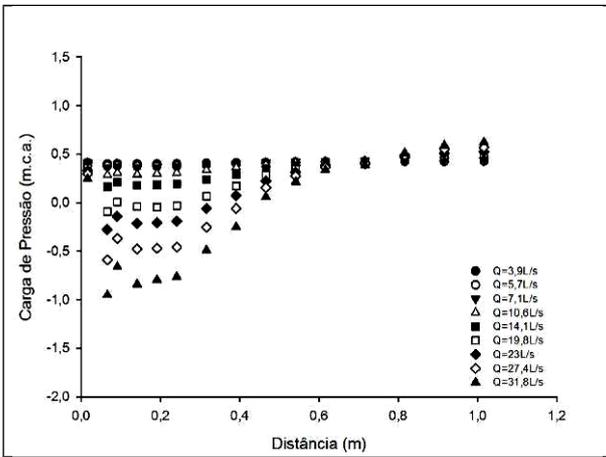


Figura 89 – Pressão 1% na base (a=50%)

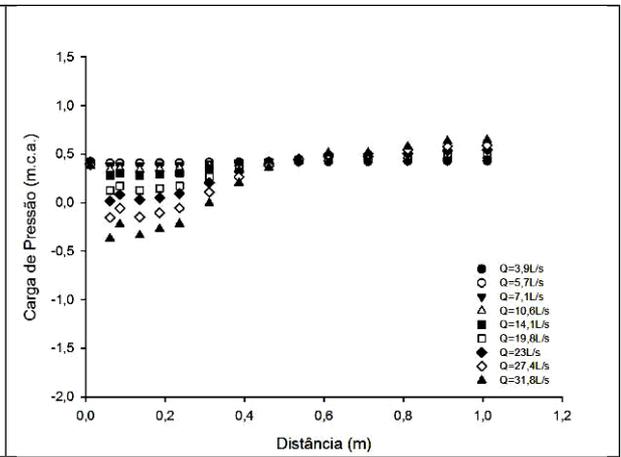


Figura 90 – Pressão 1% na base (a=60%)

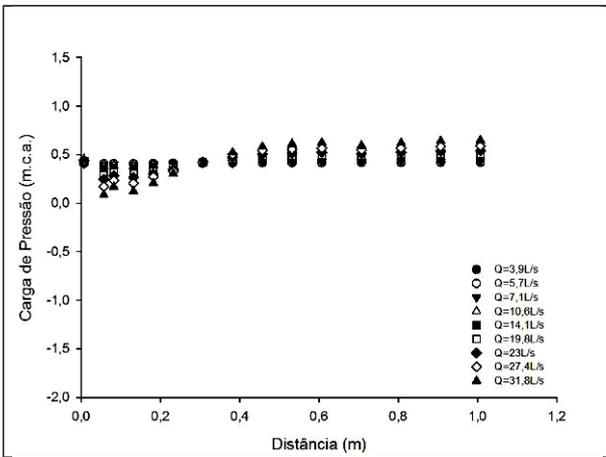


Figura 91 – Pressão 1% na base (a=70%)

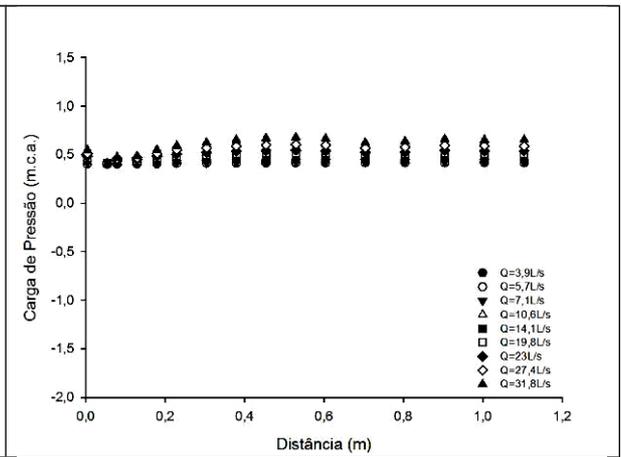
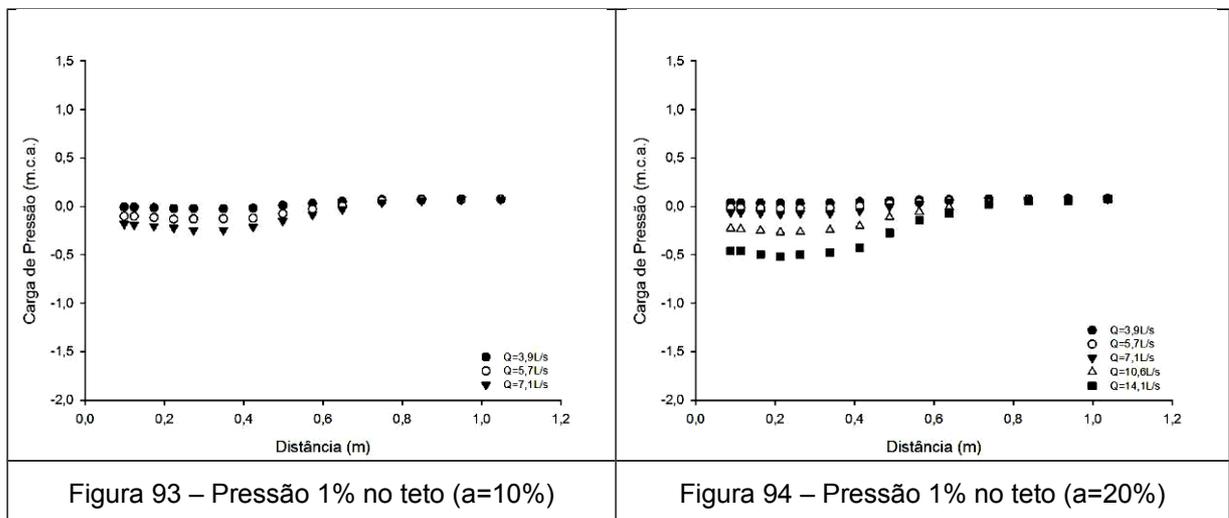


Figura 92 – Pressão 1% na base (a=80%)

Após a análise das figuras apresentadas observa-se que:

- existe uma região (zona de influência da comporta), onde se concentram as pressões mais baixas, no trecho do aqueduto entre 0,1m e 0,4m, que exigem mais atenção;
- o menor valor de $P_{1\%}$ ocorreu para a abertura de 40% e vazão de 31,8L/s;
- os valores de $P_{1\%}$ são menores que as pressões médias, porém o comportamento geral é o mesmo; na região entre 0,0m e 0,4m, onde ocorrem as pressões mínimas, a pressão e a vazão mostram um comportamento inversamente proporcional, pois quanto maior a vazão menor a carga de pressão $P_{1\%}$ para uma mesma abertura;
- as pressões $P_{1\%}$ não sofrem a influência da comporta ao final do aqueduto, logo sofrem apenas o efeito da perda de carga linear.

Da Figura 93 até a Figura 100 estão apresentadas as pressões com probabilidade de não excedência de 1% ($P_{1\%}$) para o teto do aqueduto em relação à distância da comporta segmento invertida.



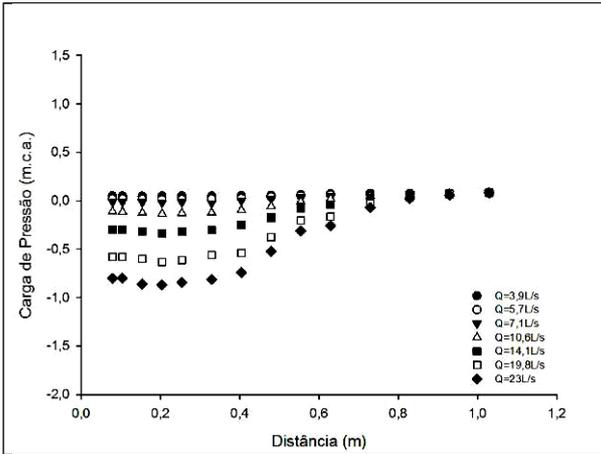


Figura 95 – Pressão 1% no teto ($a=30\%$)

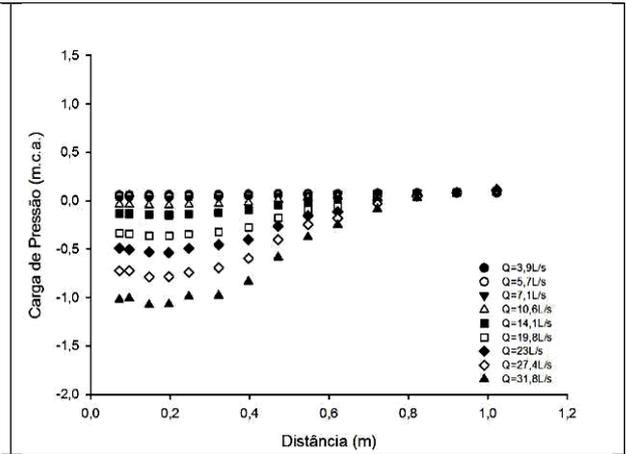


Figura 96 – Pressão 1% no teto ($a=40\%$)

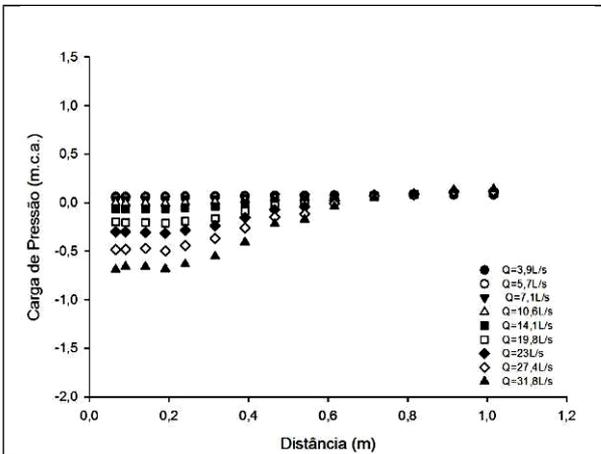


Figura 97 – Pressão 1% no teto ($a=50\%$)

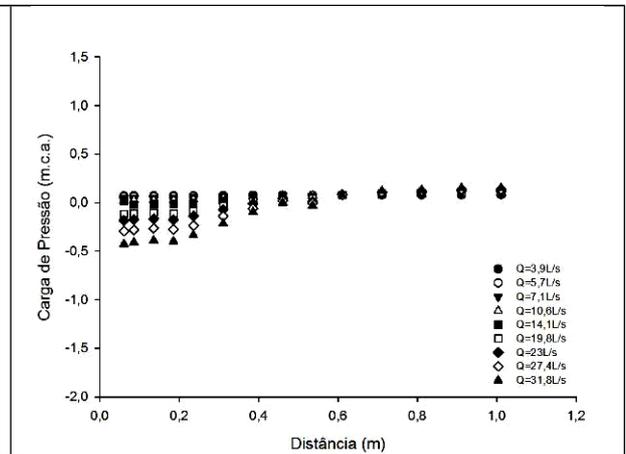


Figura 98 – Pressão 1% no teto ($a=60\%$)

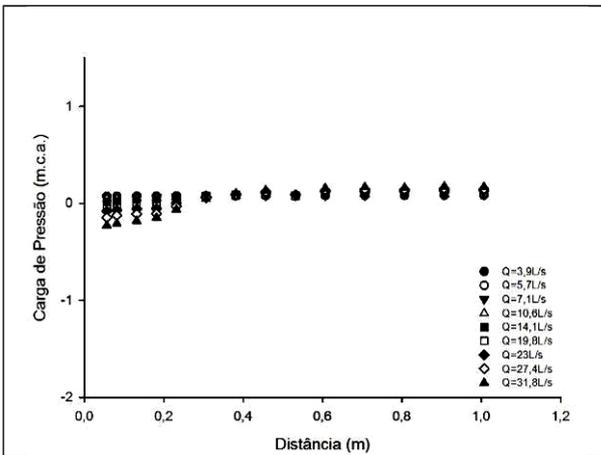


Figura 99 – Pressão 1% no teto ($a=70\%$)

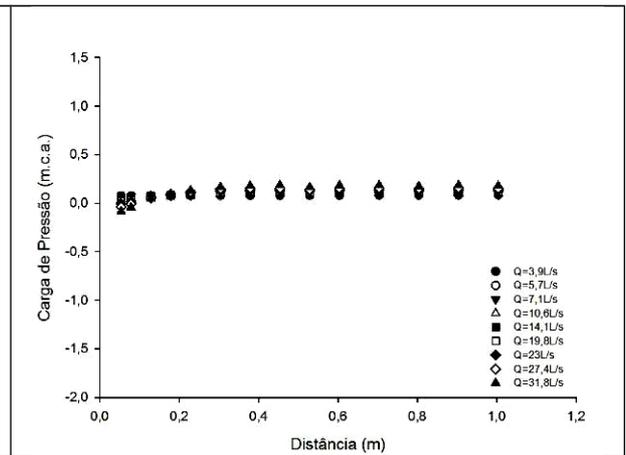


Figura 100 – Pressão 1% no teto ($a=80\%$)

Após a análise das figuras apresentadas, observa-se que:

- a) o comportamento das pressões $P_{1\%}$ segue a mesma tendência das pressões médias, sendo, contudo, inferiores como esperado;

- b) as pressões $P_{1\%}$ gradualmente vão ficando com amplitude maior até a abertura de 40% onde se verifica a maior amplitude dos dados e logo após na abertura de 50% já apresenta aumento do valor pressão e segue gradualmente se aproximando de zero até a abertura de 80%, onde apresenta valor praticamente constante;
- c) existe uma região onde se concentram as pressões mais baixas no teto do aqueduto entre 0,1m e 0,4m, que exigem mais atenção;
- d) o menor valor de pressão $P_{1\%}$ ocorreu para a abertura de 40% e vazão de 31,8L/s;
- e) quanto maior vazão menores as pressões $P_{1\%}$ obtidas, na região das onde ocorrem as pressões mínimas, para um mesmo grau de abertura da comporta;
- f) o efeito da perda de carga linear prevalece ao final do aqueduto, onde a influência da comporta termina, mantendo as pressões $P_{1\%}$ praticamente constantes e iguais ao nível de jusante.

5.3.2 Pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência ($P_{0,1\%}$)

O comportamento das cargas de pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% para a base do aqueduto estão apresentadas no Anexo A, uma vez que o comportamento característico das pressões apresentado até aqui se repete, porém com pressões ainda menores que as apresentadas para a probabilidade de não excedência de 1% para a base. Apenas como forma de exemplificar, apresenta-se na Figura 101 e na Figura 102 as pressões para as aberturas de 30% e 40%.

O comportamento das cargas de pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% para a o teto do aqueduto estão apresentadas no Anexo B, uma vez que o comportamento característico das pressões apresentado até aqui se repete, porém com pressões ainda menores que as apresentadas para a probabilidade de não excedência de 1% para o teto. Apenas como forma de exemplificar, apresenta-se na Figura 103 e na Figura 104 as pressões para as aberturas de 30% e 40%.

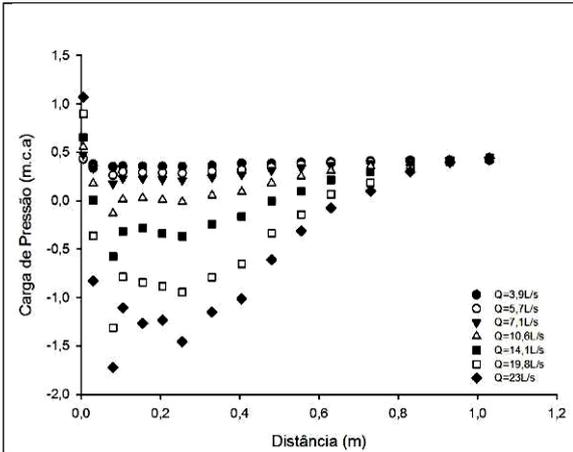


Figura 101 – Pressão 0,1% na base ($\alpha=30\%$)

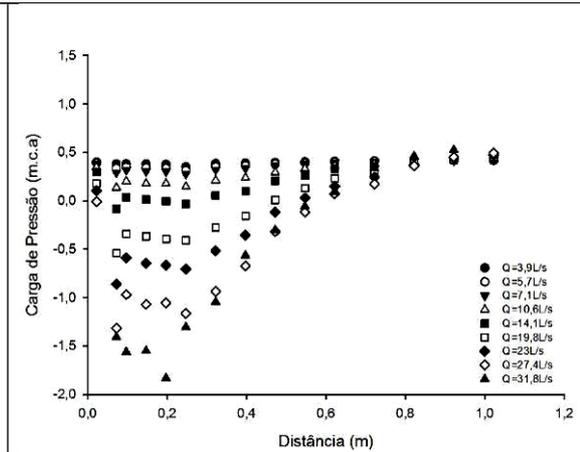


Figura 102 – Pressão 0,1% na base ($\alpha=40\%$)

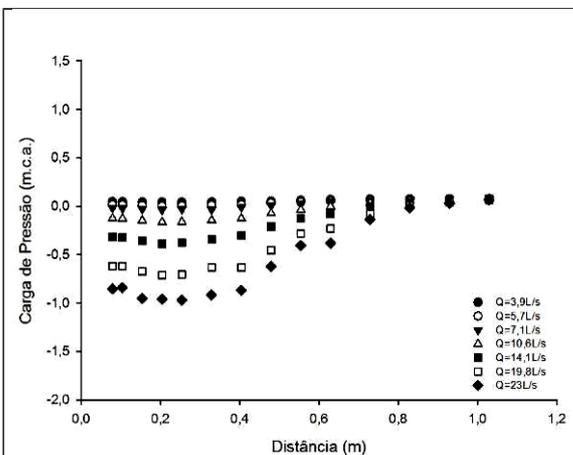


Figura 103 – Pressão 0,1% no teto ($\alpha=30\%$)

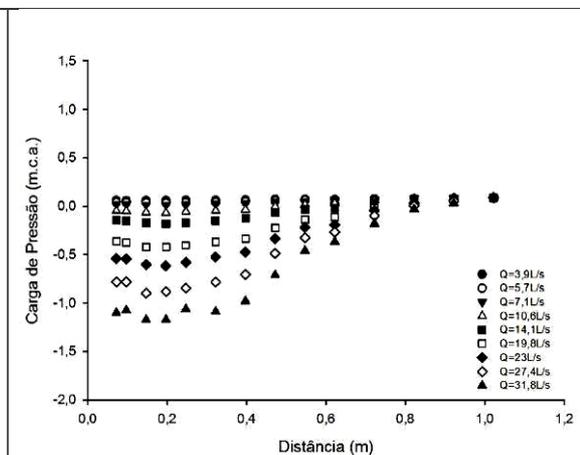


Figura 104 – Pressão 0,1% no teto ($\alpha=40\%$)

5.3.3 Comportamento dos coeficientes de pressões adimensionais mínimas ($CP_{adm1\%}$ e $CP_{adm0,1\%}$)

A caracterização do comportamento das pressões instantâneas junto à base e ao teto do conduto a jusante da comporta são imprescindíveis para a identificação de picos de pressão que mesmo em curto período de tempo podem atingir à estrutura. Logo foi realizado o estudo adimensional das pressões com probabilidade de ocorrerem em um tempo inferior a 1% e a 0,1%.

O comportamento das pressões 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 ($CP_{adm1\%}$ e $CP_{adm0,1\%}$). Para a caracterização das pressões mínimas foi aplicada a equação 9 para o cálculo do $CP_{adm1\%}$ e do $CP_{adm0,1\%}$, substituindo o valor da carga de pressão média pela carga de pressão com

probabilidade de não excedência de 1% ou de 0,1%, seguindo metodologia proposta por Battiston (2013).

A Figura 105 até a Figura 112 apresentam o comportamento dos coeficientes adimensionais com probabilidade de não excedência de 1%, na base do aqueduto. Em todas as figuras além do ajuste de curva encontrado na presente pesquisa, também são apresentados os ajustes obtidos nas pesquisas de Battiston (2013) e de Kempka (2014).

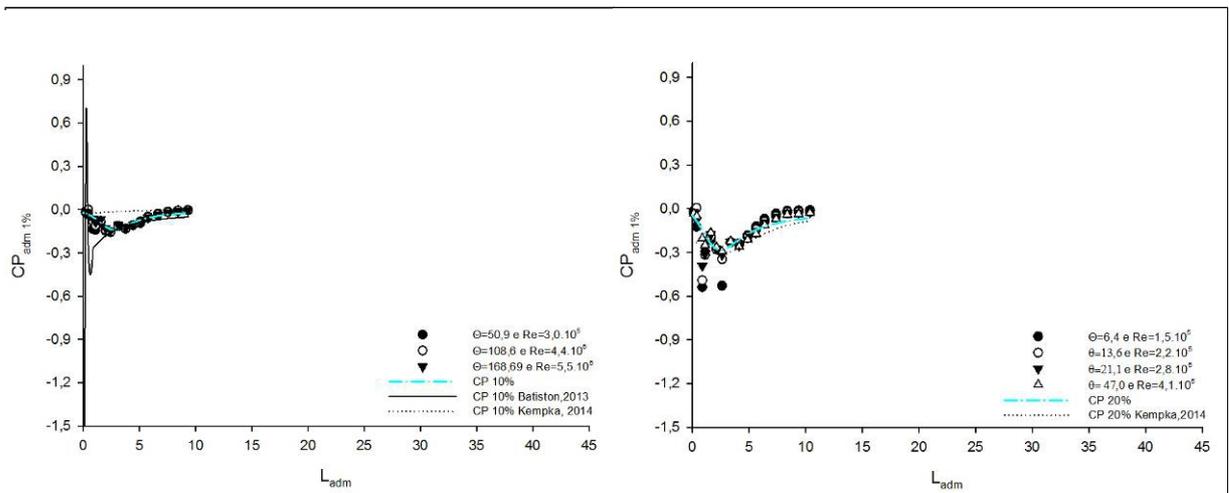


Figura 105 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=10\%$)

Figura 106 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=20\%$)

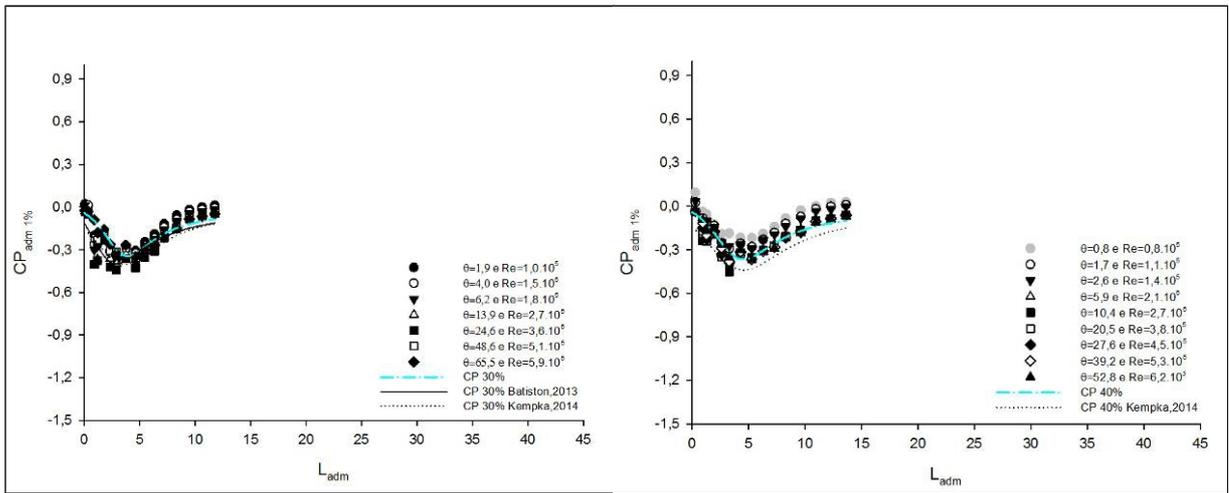
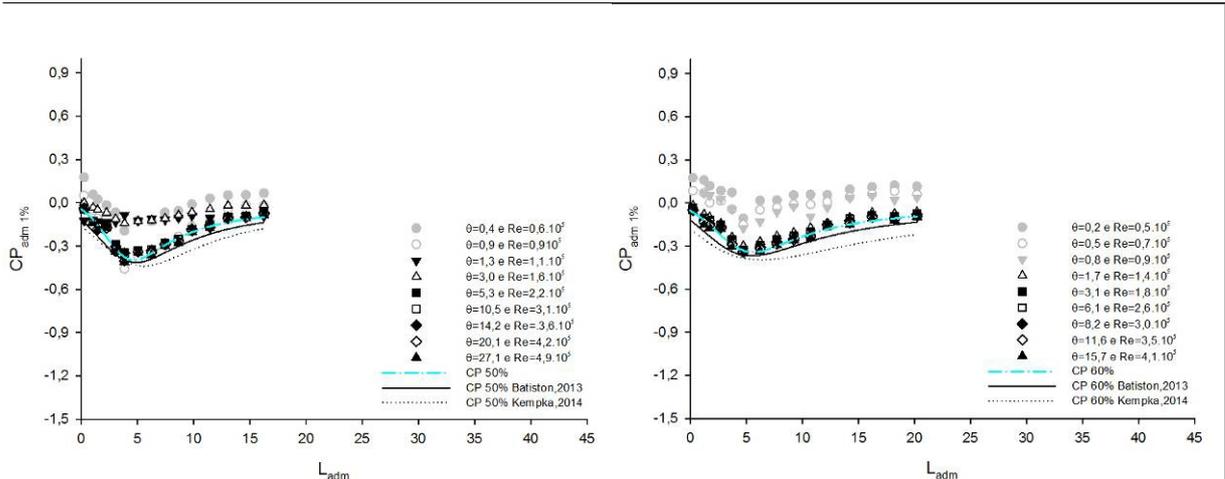
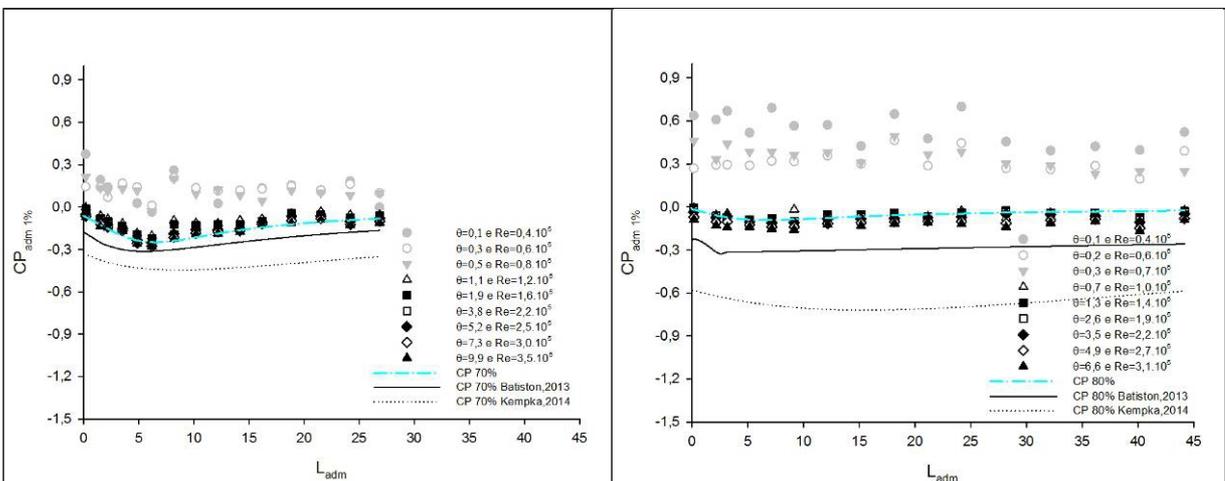


Figura 107 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=30\%$)

Figura 108 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=40\%$)

Figura 109 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=50\%$)Figura 110 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=60\%$)Figura 111 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=70\%$)Figura 112 – $CP_{adm1\%}$ na base ($a=80\%$)

A partir da análise das figuras percebe-se que:

- o comportamento dos coeficientes adimensionais para $P_{1\%}$ segue a mesma tendência geral dos coeficientes de pressões médias;
- o menor valor dos coeficientes adimensionais para $P_{1\%}$ ocorreu para a abertura de 20% e vazão de 3,9L/s;
- os coeficientes mínimos adimensionais para $P_{1\%}$ ocorrem logo a jusante da comporta e depois tendem a ocorrer mais a jusante conforme aumenta a abertura da comporta;
- para um mesmo grau de abertura da comporta, os valores de $CP_{1\%}$ são inversamente proporcionais às vazões, ou seja, quanto maior a vazão menor o valor de $CP_{1\%}$ na região onde ocorrem as pressões mínimas;

- e) o $CP_{1\%}$, após o término da influência da comporta, permanece constantes e igual ao nível de jusante, a partir deste momento tem-se, apenas, o efeito da perda de carga linear;
- f) da mesma forma como apresentado nos coeficientes de pressão média, aqui percebe-se que para condições de ensaio com número de Reynolds superiores a 10^5 os dados experimentais se agrupam em torno de uma mesma tendência;
- g) as curvas de ajustes encontradas para $CP_{1\%}$ se apresentam semelhantes as curvas encontradas por Kempka (2014) e Battiston (2013), porém sempre com valores de coeficientes superiores, sendo que nas maiores aberturas a diferença aumenta;
- h) as curvas de ajuste encontradas na presente pesquisa se apresentam um pouco mais próximas das curvas apresentadas por Battiston (2013) do que das curvas de ajuste de Kempka (2014);
- i) as vazões de 3,9, 5,7, 7,1 e 10,6L/s para o grau de abertura de 50, 60, 70 e 80% estão fora da tendência geral de ajuste, pois apresentam número de Reynolds menor do que 10^5 , limite para os ajustes de equação deste trabalho. Este valor é inferior ao apresentado por Battiston (2013) que era de $3 \cdot 10^5$.

Na Figura 113 estão apresentadas as curvas de ajuste de $CP_{adm\ 1\%}$ na base do aqueduto para todos os graus de abertura da comporta.

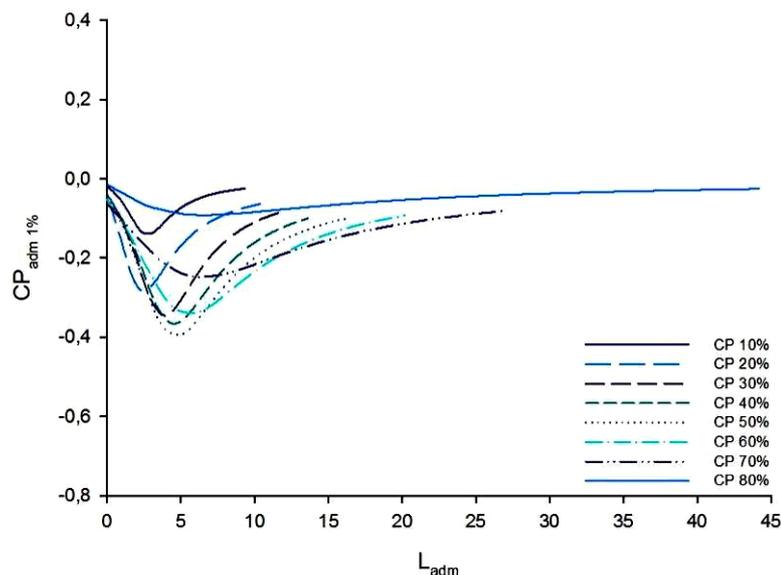


Figura 113 – Curvas de ajuste do $CP_{adm\ 1\%}$ para a base do aqueduto

As curvas ajustadas para a base do aqueduto são representadas pela função racional de 4 parâmetros descrita pela equação 10 e os coeficientes (a, b, c, d) encontrados na presente pesquisa estão apresentados na Tabela 7 e comparados aos encontrados por Battiston (2013) e por Kempka (2014).

Tabela 7 - Comparação entre os $CP_{adm1\%}$ na base do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).

Abertura da comporta	Referência	Coeficiente				R ²
		a	b	c	d	
10%	Presente Pesquisa	-0,0205	-0,0135	-0,5245	0,1127	0,87
	Battiston (2013)	206162	-699.277	530.800	1381560	0,98
	Kempka (2014)	-0,3220	0,0256	0,3004	-0,0099	0,95
20%	Presente Pesquisa	-0,0487	-0,0606	-0,4517	0,1335	0,82
	Kempka (2014)	-0,2097	-0,016	-0,2165	0,05412	0,94
30%	Presente Pesquisa	-0,0427	-0,0299	-0,3619	0,0574	0,91
	Battiston (2013)	-0,1148	-0,0798	-0,2932	0,0851	0,96
	Kempka (2014)	-0,1569	-0,0292	-0,2631	0,04601	0,94
40%	Presente Pesquisa	-0,0415	-0,033	-0,3015	0,0433	0,94
	Kempka (2014)	-0,1418	-0,0343	-0,221	0,0328	0,85
50%	Presente Pesquisa	-0,0448	-0,0417	-0,2746	0,0406	0,95
	Battiston (2013)	-0,119	-0,0427	-0,1926	0,0306	0,94
	Kempka (2014)	-0,1613	-0,0349	-0,1507	0,0209	0,78
60%	Presente Pesquisa	-0,0548	-0,0337	-0,2021	0,0269	0,96
	Battiston (2013)	-0,1202	-0,0449	-0,1247	0,0226	0,91
	Kempka (2014)	-0,1825	-0,0553	-0,0319	0,0136	0,85
70%	Presente Pesquisa	-0,0628	-0,0313	-0,1051	0,0179	0,92
	Battiston (2013)	-0,1742	-0,0799	0,0944	0,0146	0,64
	Kempka (2014)	-0,3307	-0,0591	0,0723	0,0035	0,40
80%	Presente Pesquisa	-0,0147	-0,0216	-0,0189	0,0193	0,76
	Battiston (2013)	144,6	-2904,8	8914,5	52,2	0,36
	Kempka (2014)	-0,5802	-0,0342	0,0226	0,0008	0,25

Da Figura 114 até a Figura 121 estão apresentados os comportamentos longitudinais dos coeficientes adimensionais de pressões com probabilidade de não excedência de 1% no teto do aqueduto. Em todas as figuras, além do ajuste de curva encontrado na presente pesquisa, também estão apresentados os ajustes obtidos por Battiston (2013) e Kempka (2014).

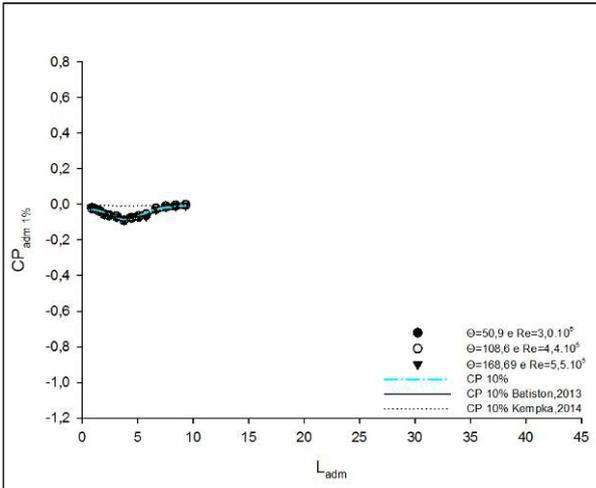


Figura 114 – $CP_{adm1\%}$ no teto ($a=10\%$)

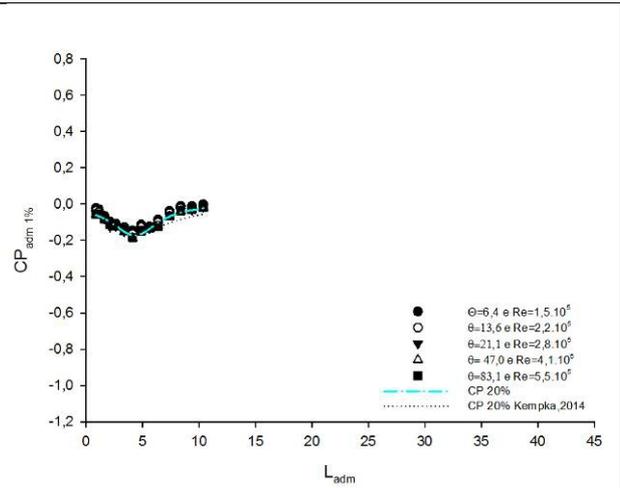


Figura 115 – $CP_{adm1\%}$ no teto ($a=20\%$)

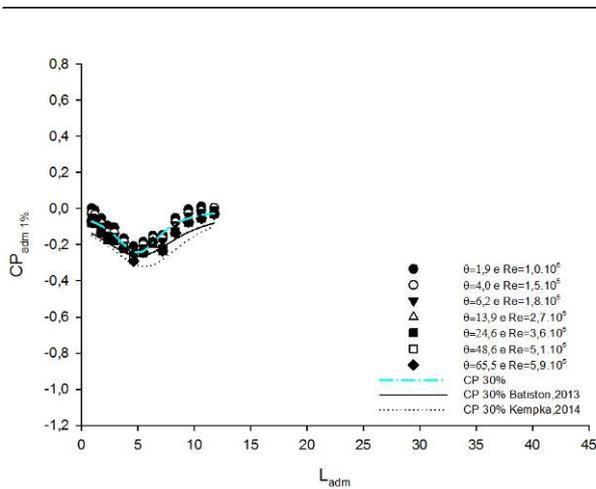


Figura 116 – $CP_{adm1\%}$ no teto ($a=30\%$)

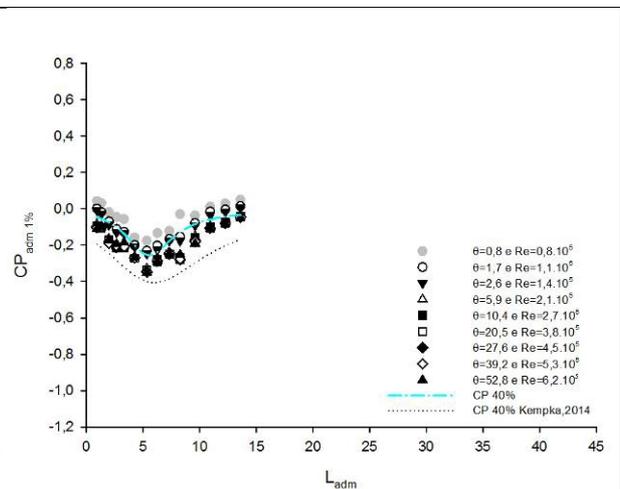


Figura 117 – $CP_{adm1\%}$ no teto ($a=40\%$)

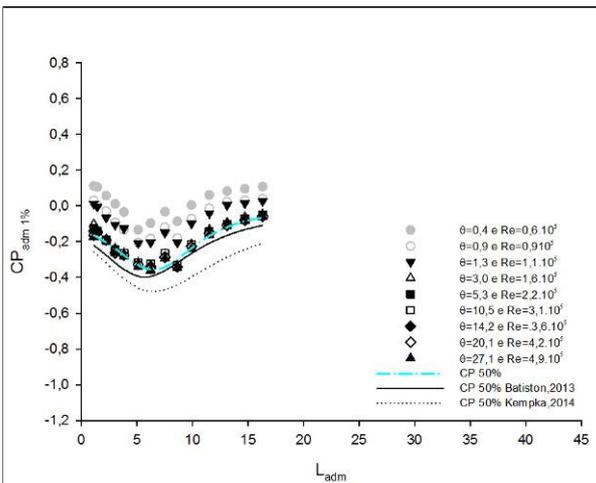


Figura 118 – $CP_{adm1\%}$ no teto ($a=50\%$)

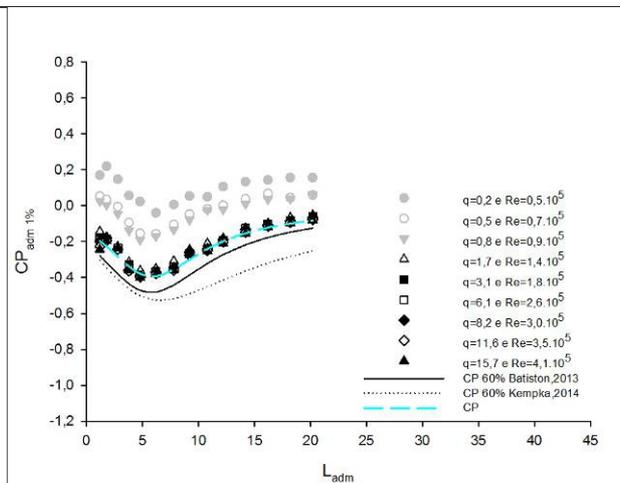
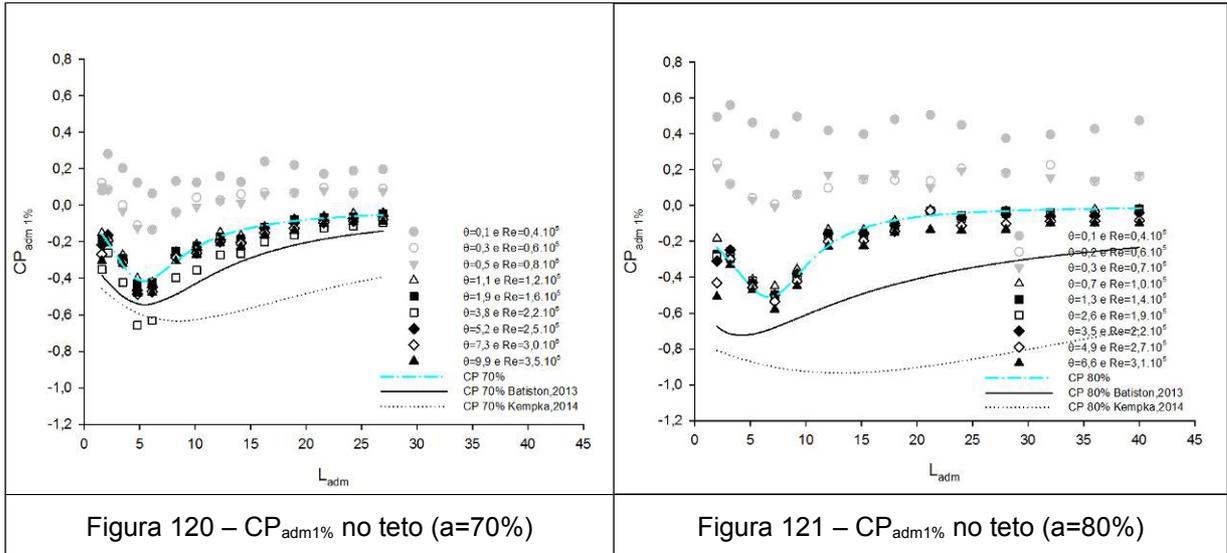


Figura 119 – $CP_{adm1\%}$ no teto ($a=60\%$)



A partir da análise das figuras percebe-se que:

- a variação dos coeficientes adimensionais junto ao teto do aqueduto foi influenciada pela abertura da comporta e pela vazão, sendo que as maiores variações dos coeficientes adimensionais de pressão no teto foram detectadas ao se afastar da comporta conforme aumentou a abertura da mesma;
- o comportamento dos coeficientes adimensionais para $P_{1\%}$ segue a mesma tendência geral das pressões médias;
- o menor valor dos coeficientes adimensionais para $P_{1\%}$ ocorreu para a abertura de 70% e vazão de 19,8L/s;
- os coeficientes mínimos adimensionais para $P_{1\%}$ tem um rápido decréscimo logo a jusante da comporta e depois tendem aumentar conforme aumenta a distância da mesma;
- para uma dada abertura, os valores de $CP_{1\%}$ são inversamente proporcionais às vazões, ou seja, se a vazão aumenta, o valor de $CP_{1\%}$ diminui na região onde ocorrem as pressões mínimas;
- os valores de $CP_{1\%}$, após o término da influência da comporta, ficam praticamente constantes e iguais ao nível de jusante, a partir deste momento tem-se, apenas, o efeito da perda de carga linear.
- as curvas de ajustes encontradas para $CP_{1\%}$ se apresentam semelhantes as curvas encontradas por Kempka (2014) e Battiston (2013), porém sempre com valores de coeficientes superiores, sendo que nas maiores

aberturas a diferença aumenta e fica notável a dispersão das três menores vazões;

- h) até a posição 5 as curvas de ajuste comparadas apresentam uma maior coerência e após esta posição, quanto maior a posição mais aumenta a diferença, principalmente na maiores aberturas;
- i) as vazões de 3,9L/s até 10,6L/s para o grau de abertura de 50, 60, 70 e 80% estão fora da tendência geral de ajuste, pois apresentam número de Reynolds menor do que 10^5 , limite para os ajustes de equação deste pesquisa. Este valor limite de Reynolds é inferior ao apresentado por Battiston (2013) que era de $3 \cdot 10^5$.

Na Figura 122 estão apresentadas as curvas de ajuste de $CP_{adm1\%}$ no teto do aqueduto para todos os graus de abertura da comporta.

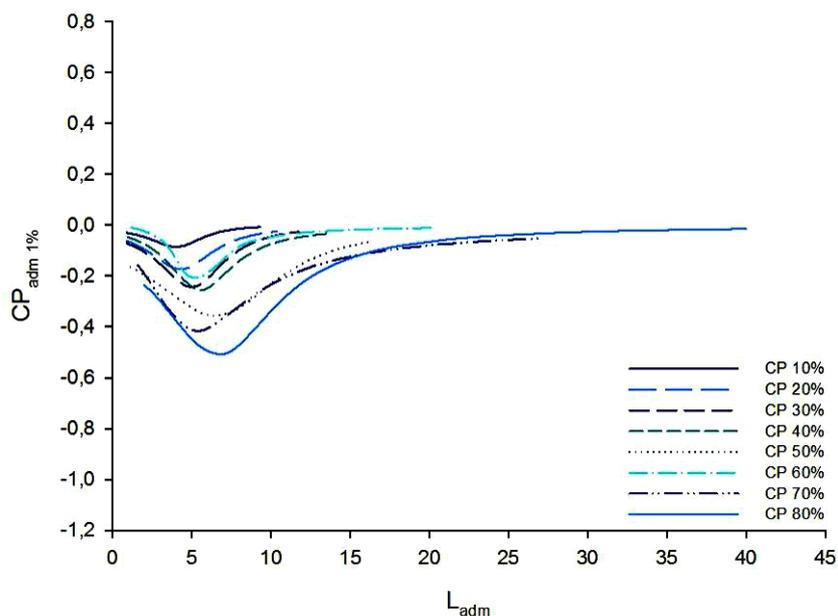


Figura 122 – Curvas de ajuste do $CP_{adm1\%}$ para o teto do aqueduto

Na Tabela 8 estão apresentados os coeficientes adimensionais registrados na presente pesquisa, e comparados aqueles indicados por Battiston (2013) e por Kempka (2014).

Tabela 8 - Comparação entre os $CP_{adm1\%}$ no teto do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).

Abertura da comporta	Referência	Coeficiente				R ²
		a	b	c	d	
10%	Presente Pesquisa	-0,0218	0,0012	-0,3839	0,0458	0,94
	Battiston (2013)	-0,0275	-0,0002	-0,3183	0,0399	0,96
	Kempka (2014)	-0,0305	-0,0049	-0,2769	0,0446	0,92
20%	Presente Pesquisa	-0,045	0,00032	-0,3447	0,0397	0,96
	Kempka (2014)	-0,0539	-0,0019	-0,2427	0,0264	0,78
30%	Presente Pesquisa	-0,054	0,00108	-0,3158	0,0311	0,93
	Battiston (2013)	-0,1104	-0,0006	-0,2272	0,0227	0,86
	Kempka (2014)	-0,124	0,0015	-0,2235	0,0195	0,85
40%	Presente Pesquisa	-0,032	-0,00276	-0,3045	0,0284	0,91
	Kempka (2014)	-0,1541	-0,0098	-0,1823	0,0172	0,67
50%	Presente Pesquisa	-0,1331	0,00131	-0,1966	0,0148	0,95
	Battiston (2013)	-0,1726	-0,0074	-0,18	0,0174	0,97
	Kempka (2014)	-0,2009	-0,0174	-0,1421	0,0137	0,71
60%	Presente Pesquisa	-0,1425	-0,0126	-0,1850	0,0184	0,95
	Battiston (2013)	-0,2102	-0,019	-0,1567	0,017	0,97
	Kempka (2014)	-0,2214	-0,0481	-0,0842	0,0133	0,89
70%	Presente Pesquisa	-0,0611	-0,0284	-0,2502	0,0298	0,95
	Battiston (2013)	-0,265	-0,0452	-0,1036	0,0161	0,97
	Kempka (2014)	-0,3582	-0,0685	0,0042	0,0062	0,70
80%	Presente Pesquisa	-0,1466	-0,00312	-0,2077	0,016	0,97
	Battiston (2013)	-0,4867	-0,1931	0,1102	0,0186	0,94
	Kempka (2014)	-0,7566	-0,0339	0,0073	0,0011	0,40

Os comportamentos longitudinais dos coeficientes adimensionais de pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% ($CP_{adm0,1\%}$) para a base do conduto seguem comportamento bastante semelhante aos $CP_{adm1\%}$. Desta forma apresenta-se a Figura 123 e a Figura 124 relativos as aberturas de 30% e 40%, sendo que as demais estão apresentadas no anexo C.

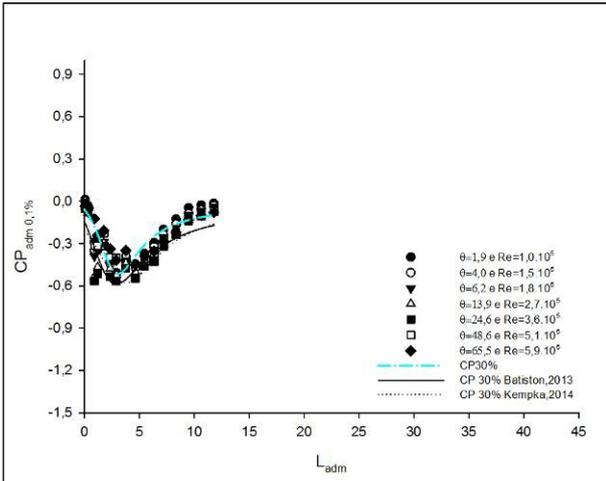


Figura 123 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=30\%$)

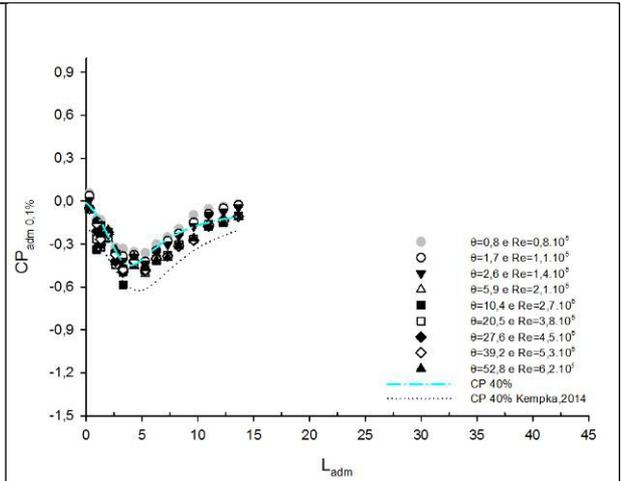


Figura 124 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=40\%$)

Na Figura 125 são apresentadas as curvas de ajuste de $CP_{0,1\%}$ na base do aqueduto para todos os graus de abertura da comporta.

Na Tabela 3 estão apresentados os coeficientes adimensionais registrados na presente pesquisa, e comparados com aqueles indicados por Battiston (2013) e por Kempka (2014).

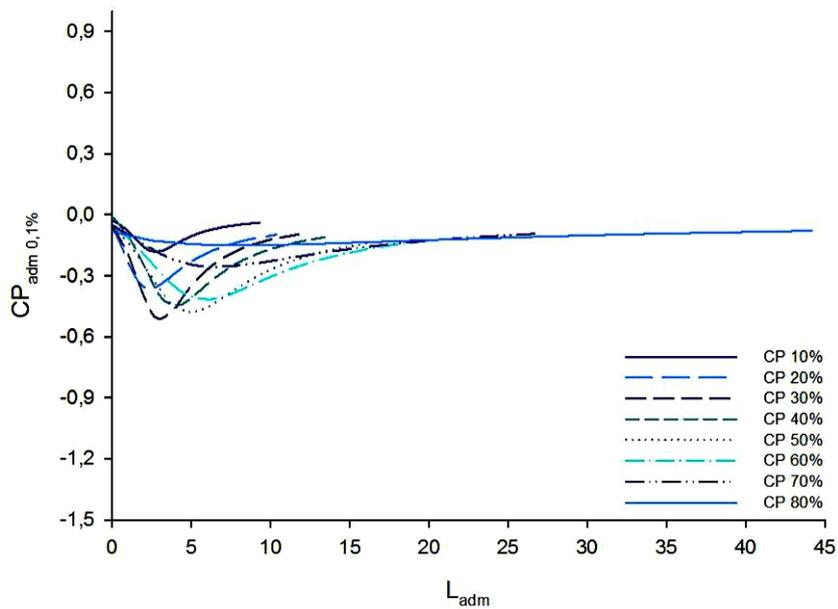


Figura 125 – Curvas de ajuste do $CP_{adm0,1\%}$ para a base do aqueduto

Tabela 3 - Comparação entre os $CP_{adm0,1\%}$ na base do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).

Abertura da comporta	Referência	Coeficientes				R ²
		a	b	c	d	
10%	Presente Pesquisa	-0,0273	-0,0222	-0,4929	0,1111	0,93
	Battiston (2013)	2708726	-8621411	4211615	11418220	0,97
	Kempka (2014)	-0,4166	0,0315	0,1854	0,0067	0,94
20%	Presente Pesquisa	-0,0566	-0,1194	-0,3862	0,1507	0,90
	Kempka (2014)	-0,2889	-0,0200	-0,2382	0,0561	0,93
30%	Presente Pesquisa	-0,0581	-0,0673	-0,4472	0,0943	0,93
	Battiston (2013)	-0,145	-0,1291	-0,2972	0,0886	0,96
	Kempka (2014)	-0,2028	-0,0397	-0,2788	0,0464	0,95
40%	Presente Pesquisa	-0,0126	-0,0595	-0,3565	0,0616	0,96
	Kempka (2014)	-0,1773	-0,0453	-0,2327	0,0325	0,89
50%	Presente Pesquisa	-0,0536	-0,0526	-0,2499	0,0364	0,99
	Battiston (2013)	-0,164	-0,0606	-0,1703	0,026	0,93
	Kempka (2014)	-0,2133	-0,0381	-0,1600	0,0191	0,84
60%	Presente Pesquisa	-0,052	-0,0426	-0,1937	0,025	0,98
	Battiston (2013)	-0,1654	-0,0597	-0,1014	0,0179	0,91
	Kempka (2014)	-0,2319	-0,0627	-0,0571	0,0129	0,90
70%	Presente Pesquisa	-0,0505	-0,0404	-0,0886	0,0188	0,94
	Battiston (2013)	-0,2357	-0,1295	0,1589	0,0119	0,52
	Kempka (2014)	0,4129	-0,081	0,0641	0,0043	0,48
80%	Presente Pesquisa	-0,0816	-0,0331	0,1073	0,0070449	0,84
	Battiston (2013)	-0,2208	-1,7759	3,9533	0,0229	0,36
	Kempka (2014)	-0,7358	-0,0444	0,0178	0,001	0,31

Os comportamentos longitudinais dos coeficientes adimensionais de pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% ($CP_{adm0,1\%}$) para o teto do conduto seguem comportamento bastante semelhante aos $CP_{adm1\%}$. Desta forma apresenta-se a Figura 126 e a Figura 127 relativos as aberturas de 30% e 40%, sendo que as demais estão apresentadas no anexo D.

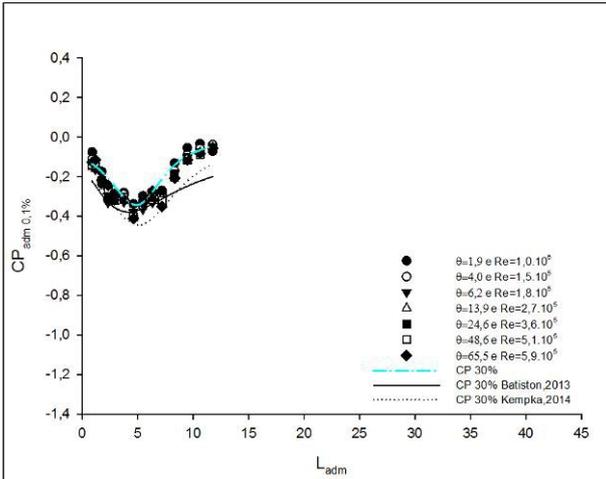


Figura 126 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=30\%$)

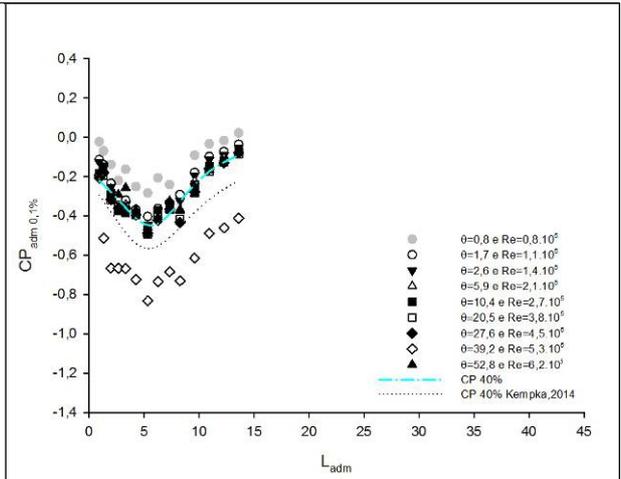


Figura 127 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=40\%$)

Na Figura 128 são apresentadas as curvas de ajuste de $CP_{adm0,1\%}$ no teto do aqueduto para todos os graus de abertura da comporta.

Na Tabela estão apresentados os coeficientes adimensionais registrados na presente pesquisa, e comparados aqueles indicados por Battiston (2013) por Kempka (2014).

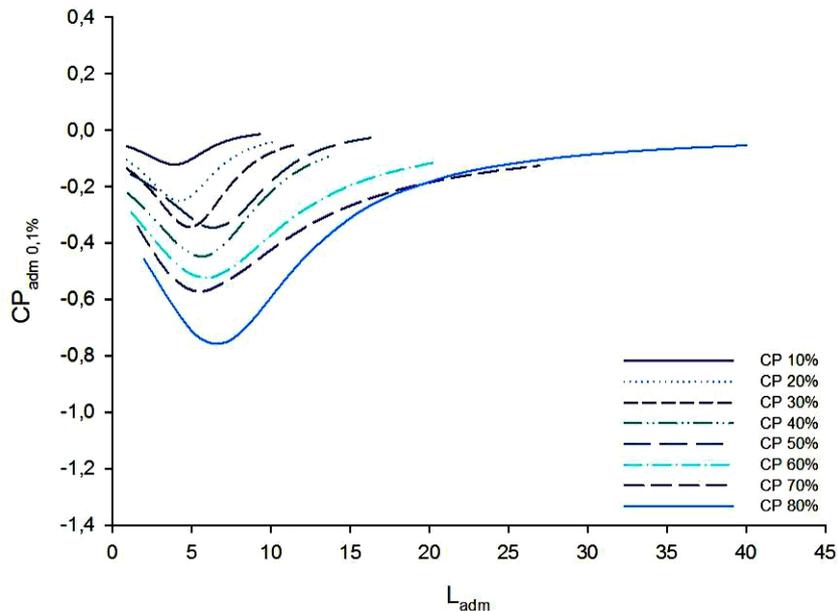


Figura 128 – Curvas de ajuste do $CP_{adm0,1\%}$ para o teto do aqueduto

Tabela 10 - Comparação entre os $CP_{adm0,1\%}$ no teto do conduto determinados nesta pesquisa, por Kempka (2014) e por Battiston (2013).

Abertura da comporta	Referência	Coeficientes				R ²
		a	b	c	d	
10%	Presente Pesquisa	-0,0433	0,0025	-0,3499	0,0420	0,91
	Battiston (2013)	-0,0288	-0,0147	-0,3436	0,0740	0,93
	Kempka (2014)	-0,0356	-0,0157	-0,3226	0,0698	0,95
20%	Presente Pesquisa	-0,0800	0,0014	-0,3276	0,0381	0,95
	Kempka (2014)	-0,0746	-0,0064	-0,2612	0,0339	0,87
30%	Presente Pesquisa	-0,1057	0,0026	-0,2912	0,0291	0,88
	Battiston (2013)	-0,1445	-0,0637	-0,1315	0,0363	0,77
	Kempka (2014)	-0,1823	-0,0012	-0,2288	0,0227	0,91
40%	Presente Pesquisa	-0,1842	0,0031	-0,2166	0,0187	0,89
	Kempka (2014)	-0,2317	-0,0193	-0,1846	0,0202	0,79
50%	Presente Pesquisa	-0,1267	0,0050	-0,2124	0,0154	0,87
	Battiston (2013)	-0,2914	-0,0447	-0,1323	0,0228	0,90
	Kempka (2014)	-0,3004	-0,0252	-0,1430	0,0149	0,79
60%	Presente Pesquisa	-0,2240	-0,0142	-0,1680	0,0166	0,96
	Battiston (2013)	-0,3793	-0,0354	-0,1083	0,0149	0,91
	Kempka (2014)	-0,3415	-0,0613	-0,0843	0,0135	0,91
70%	Presente Pesquisa	-0,1970	-0,0522	-0,1465	0,0216	0,73
	Battiston (2013)	-0,4537	-0,0663	-0,0719	0,0142	0,97
	Kempka (2014)	-0,4642	-0,1157	0,0078	0,0083	0,79
80%	Presente Pesquisa	-0,3040	-0,0152	-0,1635	0,0140	0,95
	Battiston (2013)	-0,7505	-0,2485	0,0852	0,0162	0,92
	Kempka (2014)	-0,9844	-0,1157	0,0457	0,0022	0,53

5.4 Comportamento dos Coeficientes Adimensionais Médios para a Abertura de 100% da Comporta.

Para encontrar os resultados apresentados até então, em vários momentos foram utilizados os dados das pressões médias com a abertura de 100% da comporta. Assim, sem o conhecimento do comportamento destas pressões não seria possível a aplicação da metodologia proposta. Assim, apresenta-se neste item o comportamento do escoamento no aqueduto sem a influência da comporta tipo segmento invertida.

A Figura 129 até a Figura 134 apresenta as cargas de pressão média e com 1% e 0,1% de probabilidade de não excedência na situação de comporta 100% aberta, tanto para a base quanto para o teto do aqueduto.

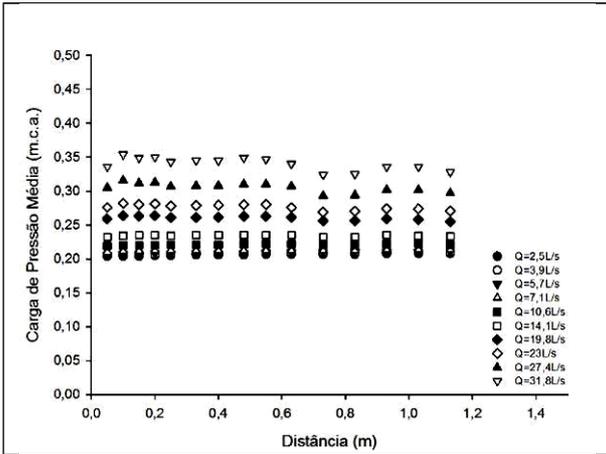


Figura 129 – Pressão média na base (a=100%)

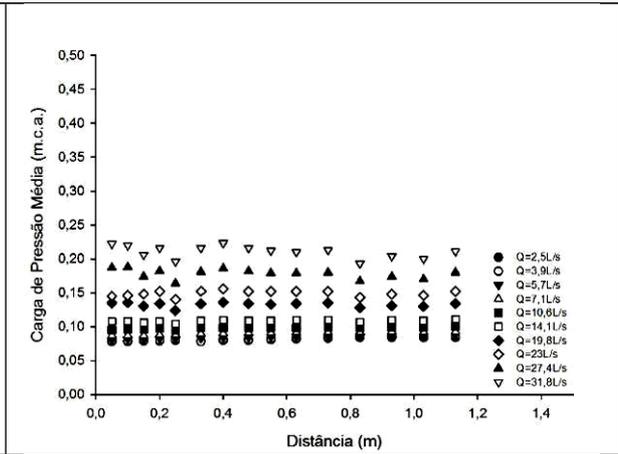


Figura 130 – Pressão média no teto (a=100%)

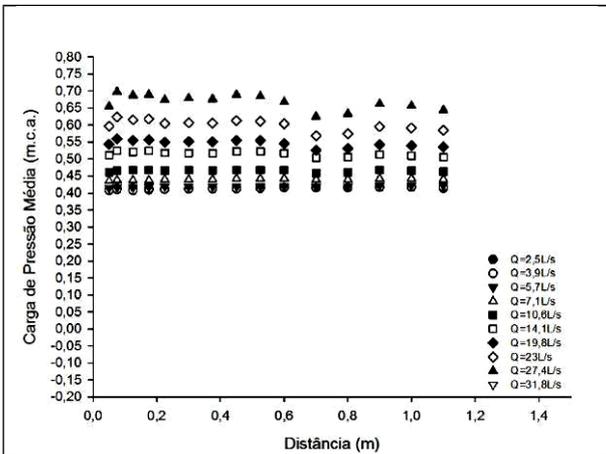


Figura 131 – P_{0,1%} na base (a=100%)

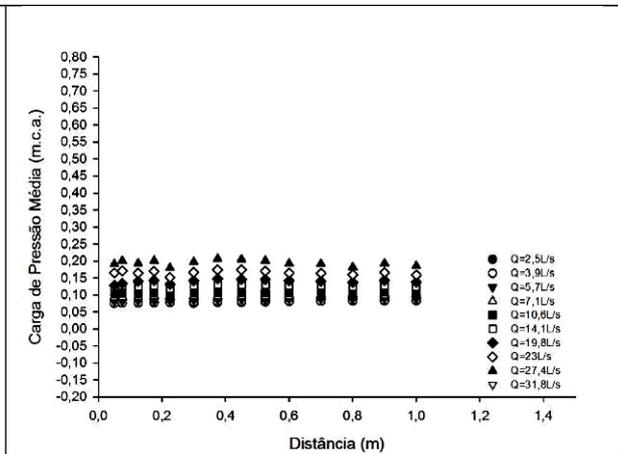


Figura 132 – P_{0,1%} no teto (a=100%)

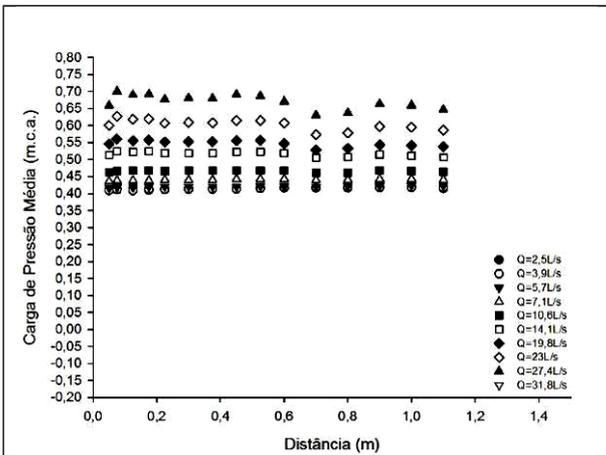


Figura 133 – P_{1%} na base (a=100%)

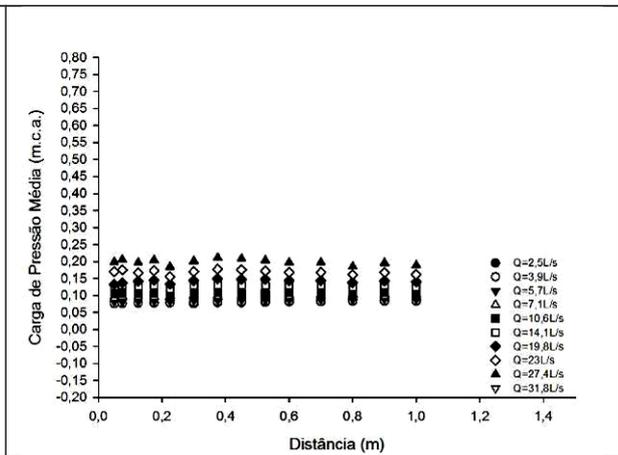


Figura 134 – P_{1%} no teto (a=100%)

Pela análise das figuras se pode perceber que:

- a) as pressões médias com a abertura de 100% da comporta, se comportam de maneira praticamente constante com pequenas oscilações, pois não

existe a influência da comporta, tanto para o teto bem como para a base do aqueduto;

- b) os dados registrados para as pressões médias apresentam-se todos positivos, ou seja, com valores acima de zero na base e teto do aqueduto;
- c) e ainda pode-se observar que quanto maior a vazão, maiores são os valores pressão média;
- d) a pressão média na base se mantém sempre com valores superiores aos encontrados no teto, tanto para $P_{0,1\%}$ bem como para $P_{1\%}$;
- e) as pressões $P_{0,1\%}$ são inferiores às pressões $P_{1\%}$, e ainda pode-se se perceber que ambas apresentam pressões inferiores as pressões médias, tanto para o teto como para a base.

Da Figura 135 à Figura 140 estão apresentados os $CP_{adm100\%}$ para as condições de pressões médias e também para as condições de pressões com 1% e 0,1% de probabilidade de não excedência. Para a construção das figuras indicadas, foi utilizada a proposta de Kempka (2014) que sugere o cálculo do $CP_{100\%}$ e do θ pelas equações 15 e 16 respectivamente.

$$CP_{100\%} = \frac{P_{100\%}/\gamma}{\frac{V^2}{2g}} \quad (125)$$

Onde:

$P_{100\%}$ é pressão média (ou pressão com probabilidade de não excedência de 1% ou de 0,1%) para a abertura de 100% da comporta;

$$\theta = \frac{Q^2}{g \cdot B^2 \cdot D^3} \quad (136)$$

Onde:

Q é a vazão;

B é a dimensão de largura do aqueduto; e

D é a dimensão de altura do aqueduto.

As figuras 135 e 140 apresentam o resultado gráfico do cálculo dos coeficientes de pressão conforme equação 12, utilizando as pressões médias, $P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$, para base e teto respectivamente, que estão apresentados no eixo vertical. Através da média dos CP_{adm} encontrados gerou-se a curva de ajuste exponencial de 2 parâmetros apresentada em cada gráfico e também foi inserida a curva de ajuste de Kempka (2014) para verificação dos resultados encontrados.

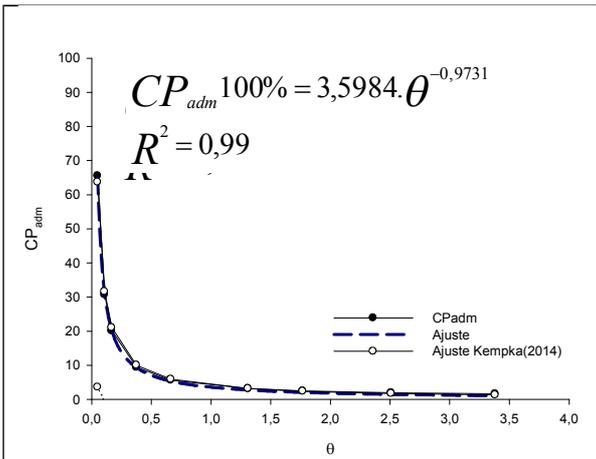


Figura 135 – CP_{adm} médio na base (a=100%)

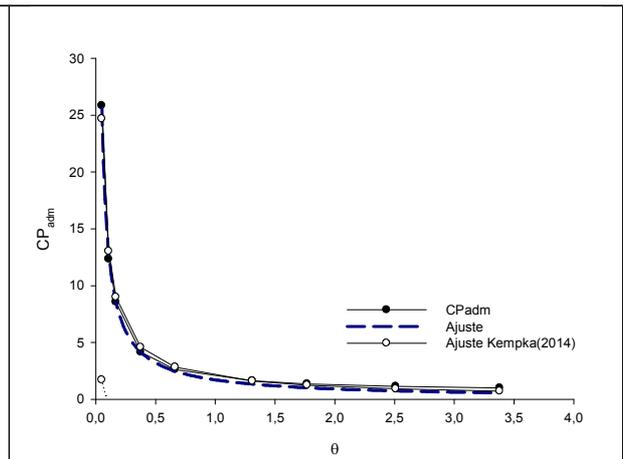


Figura 136 – CP_{adm} médio no teto (a=100%)

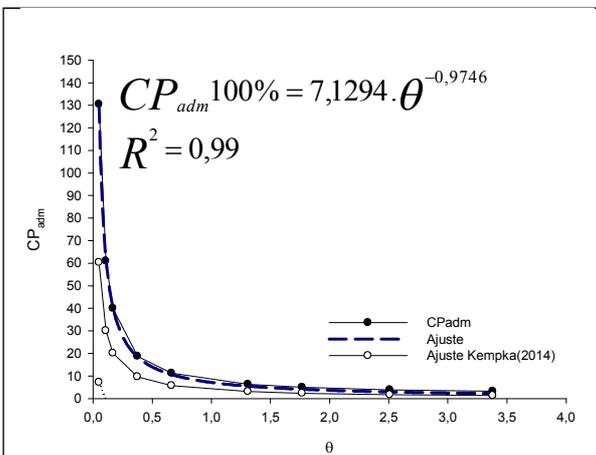


Figura 137 – $CP_{adm1\%}$ na base (a=100%)

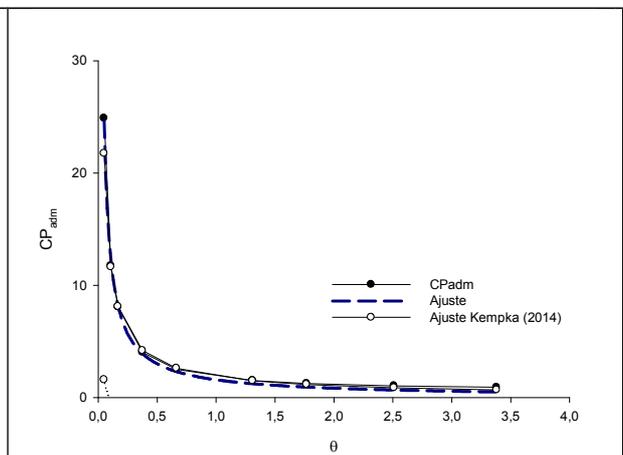


Figura 138 – $CP_{adm1\%}$ no teto (a=100%)

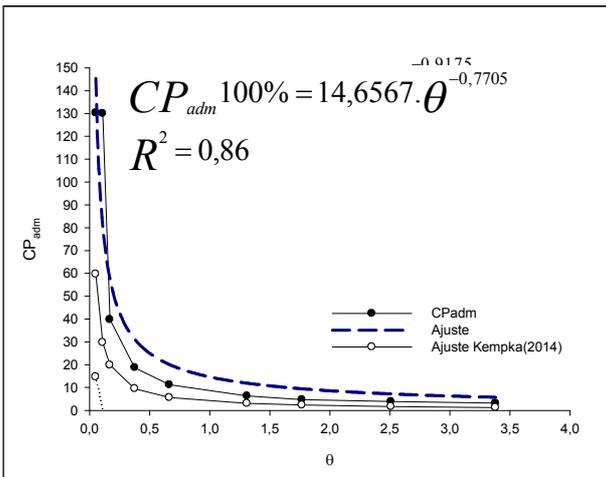


Figura 139 – $CP_{adm0,1\%}$ na base (a=100%)

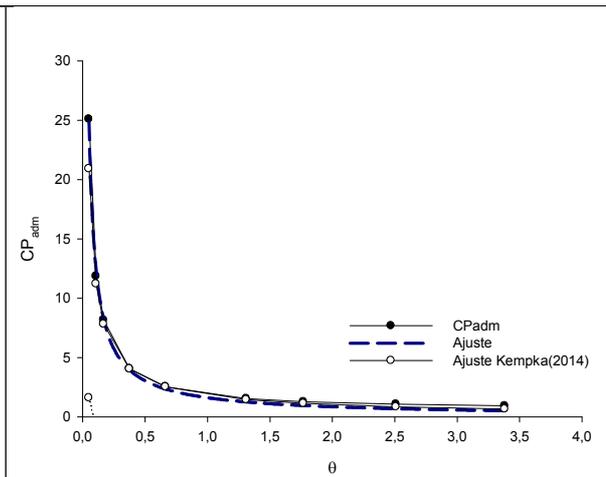


Figura 140 – $CP_{adm0,1\%}$ no teto (a=100%)

Nas figuras acima a curva de ajuste do presente trabalho para $CP_{adm100\%}$ ficou muito semelhante as encontradas por Kempka (2014), Com exceção da $CP_{adm0,1\%}$ na base, onde a curva de ajuste apresentou uma maior diferença.

6 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi entender melhor o comportamento hidrodinâmico do escoamento a jusante das comportas do tipo segmento invertida de eclusas de navegação de alta queda. Isso se deu através do estudo das pressões extremas mínimas e as pressões médias a jusante de comporta. Foi dada uma atenção maior as pressões extremas mínimas, pois estas implicam em maiores riscos de desgaste a estrutura do aqueduto, por imporem ao concreto o esforço de tração, principalmente na região logo a jusante da comporta no teto. E para tanto foi utilizado um modelo físico experimental desenvolvido no laboratório de hidráulica da UFPEL.

Neste capítulo são apresentados os principais pontos verificados com nesta pesquisa e anteriormente detalhados no capítulo 5.

6.1 Comportamento hidrodinâmico das pressões médias junto ao teto e a base do aqueduto.

Através da análise dos dados de pressão média, obtidos nas simulações experimentais de escoamento com a comporta parcialmente aberta, conclui-se que:

- a) as pressões mínimas extremas ocorrem logo a após a comporta, na região de recirculação do escoamento, tanto na base como no teto;
- b) antes da “vena contracta” as pressões são ainda menores do que após ela, tanto para teto bem como para a base;
- c) A pressão na base diminui até encontrar a “vena contracta”, onde a energia potencial é convertida em energia cinética e logo após volta a se transformar em energia potencial, assim a pressão vai se elevando até se estabilizar para vencer as perdas de carga e chegar a jusante;
- d) conforme aumenta a distância da comporta as pressões também aumento;
- e) as pressões extremas mínimas tendem a ocorrer sempre em uma mesma região, porém são sempre ainda menores no teto do que na base para uma mesma condição de ensaio;

- f) para uma mesma vazão quanto maior a abertura da comporta, maiores são as pressões médias registradas;
- g) para um mesmo grau de abertura da comporta quanto maior a vazão menores são as pressões médias registradas;
- h) para as porcentagem de abertura 70% as pressões médias na base não atingem mais valores negativos. Já para Kempka (2014) a partir da abertura de 50% não ocorreram mais pressões negativas no base e ainda Battiston (2013) a partir da abertura de 80% da comporta;
- i) para as porcentagem de abertura 80% as pressões médias no teto não atingem mais valores negativos. Já para Kempka (2014) a partir da abertura de 70% não ocorreram mais pressões negativas no teto e ainda Battiston (2013) mesmo na abertura de 80% da comporta ainda encontrou pressões negativas;
- j) a menor pressão média negativa coletada na base durante os ensaios foi a pressão de $-0,665$ m.c.a. na abertura da comporta em 40% e vazão de 31,8L/s. Para kempka (2014) a menor pressão média registrada na base também se deu na abertura de 40% e ainda Battiston (2013) encontrou a menor pressão média para a base na abertura de 50%, vale a pena salientar que esta, não apresentou a abertura de 40% em sua pesquisa ;
- k) a menor pressão média encontrada foi de $-0,885$ m.c.a na abertura de 40% com vazão de 31L/s na posição 0,1m. Para kempka (2014) a menor pressão média registrada na base se deu na abertura de 30% e ainda Battiston (2013) encontrou a menor pressão média para o teto na abertura de 50%, vale a pena salientar que esta, não apresentou a abertura de 40% em sua pesquisa, mas apresentou a abertura de 30%;
- l) após a zona de influência da comporta as pressões médias se estabilizam, tendendo a se igualar ao nível de jusante;
- m) os coeficientes de pressão tanto para base como para teto, apresentaram uma tendência geral quando o número de Reynolds do escoamento era superior a 1.10^5 . Já Battiston (2013) encontrou como limite inferior o números de Reynolds de 3.10^5 valor este também utilizado por Kempka (2014), logo acredita-se ser efeito da escala maior do modelo físico da presente pesquisa;

- n) os valores dos coeficientes adimensionais de pressão média, tanto para a base bem como para o teto, tem sua amplitude diretamente proporcional ao grau de abertura da comporta, quanto maior a abertura maior a amplitude dos coeficientes adimensionais de pressão média;
- o) os coeficientes adimensionais de pressão média na base do aqueduto tenderam a diminuir conforme aumentava a distância da comporta até determinado ponto a partir do qual os valores dos coeficientes passam a aumentar;
- p) o menor coeficientes adimensionais de pressão média encontrado na base do aqueduto foi -1,277 na posição adimensional aproximada de 1,5 na abertura de 60% com Reynolds de $3,0 \cdot 10^5$. Já Kempka (2014) encontrou seu menor CP médio de -1,3 para abertura de 50%, com Reynolds de $3,2 \cdot 10^5$ e ainda Battiston (2013) encontrou seu menor CP médio de -1,38 para a base na abertura de 60% com Reynolds de aproximadamente $6,0 \cdot 10^5$.
- q) 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 dos coeficientes diminuíram conforme aumentou o grau de abertura da comporta;
- r) o menor CP encontrado foi -1,981 na posição adimensional aproximada de 1,5 na abertura de 70% com Reynolds de $1,6 \cdot 10^5$. Já Kempka (2014) encontrou seu menor CP médio para o teto de -1,8 para a abertura de 80% com Reynolds de $4,0 \cdot 10^5$;
- s) vale a pena salientar que todos os itens acima, onde não há um comparativo com outros autores, se dá pois os resultados encontrados nesta pesquisa, também foram detectados nas pesquisas de Kempka (2014) e Battiston (2013);

6.2 Comportamento das pressões extremas junto ao teto e a base do aqueduto

A partir das simulações experimentais e no tratamento e análise das amostras de pressão, quanto aos seus valores extremos mínimos, foi possível concluir que:

- a) o grau de abertura da comporta e as vazões ensaiadas tem relação direta com o comportamento das flutuações de pressão junto à base e ao teto do aqueduto;
- b) quanto maior o grau de abertura da comporta, mais se afastam da comporta as maiores flutuações de pressão na base;
- c) no teto quanto maior o grau de abertura da comporta, mais os coeficientes adimensionais de pressão se aproximam da comporta;
- d) o menor valor dos coeficientes adimensionais de pressão na base para CP1%, ocorreu para a abertura de 20% com Reynolds de $1,5 \cdot 10^5$. Já Kempka (2014) encontrou o menor CP com probabilidade de não excedência em 1% para abertura de 80% com Reynolds de $3,0 \cdot 10^5$ e ainda Battiston (2013) não apresentou esta análise;
- e) o menor valor dos coeficientes adimensionais de pressão no teto para CP1%, ocorreu para a abertura de 70% e vazão de 19,8L/s. Já Kempka (2014) encontrou o menor CP com probabilidade de não excedência em 1% para abertura de 80% com Reynolds de $3,0 \cdot 10^5$ e ainda Battiston (2013) não apresentou esta análise;
- f) o menor valor dos coeficientes adimensionais de pressão na base para CP0,1%, ocorreu para a abertura de 20% e vazão de 5,7 L/s. Kempka (2014) encontrou o menor CP com probabilidade de não excedência em 1% para abertura de 80% com Reynolds de $3,0 \cdot 10^5$ e ainda Battiston (2013) não apresentou esta análise;
- g) o menor valor dos coeficientes adimensionais de pressão no teto para CP0,1%, ocorreu para a abertura de 70% e vazão de 19,8 L/s. Kempka (2014) encontrou o menor CP com probabilidade de não excedência em 1% para abertura de 80% com Reynolds de $3,0 \cdot 10^5$ e ainda Battiston (2013) não apresentou esta análise;
- h) os coeficientes adimensionais das pressões na base e no teto para P1% e CP0,1%, após o término da influência da comporta, ficam praticamente constantes e iguais ao nível de jusante, a partir deste momento tem-se, apenas, o efeito da perda de carga linear.

6.3 Comportamento das pressões na abertura de 100% junto a base e ao teto do aqueduto.

Com base nas características do escoamento com a comporta totalmente aberta, pode-se visualizar o impacto do estrangulamento da seção transversal sob a comporta e estabelecer dados de referência para análise do efeito dos diferentes graus de abertura comporta. Quanto ao comportamento das pressões, quando da completa abertura da comporta, pode-se afirmar que:

- a) para a abertura de 100% existe uma tendência já imediatamente a jusante da comporta de um comportamento estável e linear das pressões médias, pois não existe estrangulamento da seção transversal;
- b) os dados coletados de pressões se mantêm com valores positivos;
- c) à medida que a vazão aumenta as pressões também aumentam;
- d) as pressões na base do aqueduto são maiores que as registradas no teto devido à pressão hidrostática.

7 Recomendações

O escoamento a jusante de comportas tipo segmento invertida em eclusas de navegação é muito complexo, pois existe uma mudança brusca no comportamento do fluxo, diferença esta que vem sendo estudada por vários pesquisadores, porém ainda exige muito estudo para conclusões mais precisas sobre a caracterização do escoamento e carga de pressões que ocorrem neste ponto do aqueduto.

Com esta pesquisa, foi possível alcançar mais conhecimento sobre comportamento do escoamento a jusante da comporta dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação, avançando na caracterização das pressões médias e mínimas, produzidas na zona de recirculação, logo a jusante da comporta. E também com os resultados obtidos, foi possível validar a utilização da escala 1:32 para a análise do escoamento a jusante de comportas tipo segmento invertida.

Além do conhecimento adquirido, também algumas dificuldades foram encontradas ao longo do caminho, logo com base em todo este caminho, segue abaixo algumas recomendações para o desenvolvimento de futuras pesquisas:

- Inserir no teto e na base duas linhas de pontos de medição, para utilização simultânea dos transdutores e piezômetros, pois por menor que seja a diferença no grau de abertura da comporta, entre duas baterias de ensaios, esta existiu. E ainda este método reduziria pela metade o tempo de coleta de dados;
- Analisar mais graus de abertura da comporta, especialmente entre 30% e 60%;
- Estudar a influência das pressões flutuantes no escoamento para a escala 1:32 do modelo experimental, este estudo não foi realizado na presente pesquisa;
- O estudo através de modelos numéricos do comportamento do escoamento a jusante da comporta tipo segmento invertida na escala 1:32;

- A utilização de outras formas geométricas de aqueduto e também alterações de geometria a jusante da comporta, como expansão do teto, alargamento das laterais e rebaixamento de cotas da comporta;
- A utilização de diferentes escalas para a verificação do efeito de escala existente;
- O estudo de simulações experimentais para diferentes cargas de pressão entre montante e jusante da comporta.

Referências

ALFREDINI P. e ARASAKI, E., Obras e Gestão de Portos e Costas, Editora Blucher, 2° Edição, São Paulo - SP, 2009 p.804 (ISBN 9788521204862)

ANA. Agência Nacional das Águas. Diretrizes para Estudos de Arranjos de Obras de Transposição de Desnível para a Navegação. 44f. 2012.

ANTAQ. Agência Nacional de Transporte Aquaviário. Plano Geral de Outorgas. 2012. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/palestras/pgoportosdesenvolvimentohidroviaintermodal2012sp.pdf> Acessado em: 12 Dez. 2013.

ANTAQ. Agência Nacional de Transporte Aquaviário. Plano Geral de Outorgas. 2010. Fernando Antonio Brito Fialho Diretor -Geral da ANTAQ 5° Fórum Brasil de Comércio Exterior. Santos-SP. Disponível em : <http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/palestras/antaq2010set22dgfialhovforumbrasilcomercioexteriorpgo.pdf> Acessado em: 8 Nov.2013 (ANTAQ, 2010)

Azevedo Netto J. M. Manual de Hidraulica 680 f. - 8° Ed. 1998, São Paulo, Editora: EDGARD BLUCHER Azevedo Netto Jose Martiniano ISBN: 9788521202776.

BATTISTON, Cristiane Collet. Análise da Dinâmica do Escoamento a Jusante de Comporta de Controle de Vazão em Aqueduto de Eclusa de Navegação. 2013. 223 f. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

CANHOLI, A. P. Alguns aspectos dos esforços de amarração no projeto hidráulico de eclusas de navegação. Dissertação de Mestrado USP. São Paulo: 1984.

CEGN. Centro de Estudos em Gestão Naval. Disponível em: <https://www.linkedin.com/company/centro-de-estudos-em-gest%C3%A3o-naval---cegn> Acessado em: 16. Dez. 2013

CIDADE DE TUCURUÍ a - disponível em: <http://cidadedetucurui.com/inicio/ECLUSAS/eclusa.htm> acessado em: 09 Dez. 2013.

DAER. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem . Disponível em: http://www.daer.rs.gov.br/site/control_e_estadisticos_acidentes_transito.php Acessado em : 13 Dez. 2013

Dai Prá M. Uma Abordagem para a Determinação das Pressões Junto ao Fundo de Dissipadores de Energia por Ressalto, 2011, 208f Tese de doutorado no curso de Pós Graduação em Recursos Hidricos e Saneamento Ambiental URGs Porto Alegre.

DallaCorte et al. (2012) Análise da influência da alteração da geometria na galeria a jusante de uma comporta segmento invertida através de simulação numérica

tridimensional 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore Rio de Janeiro, 15 a 19 de Outubro de 2012

DALLA CORTE, Marcelo. Simulação numérica tridimensional do escoamento em uma comporta segmento invertida por CFD. 2013. 69 f. Dissertação de Mestrado. Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

DEMUTH ENERGY. Comporta Segmento. 2011. Disponível em: <<http://www.demuth.com.br/produtos/index.php?prod=38>>. Acesso em: 19 dez 2013.

DOURADO, C. L. Aplicações e uso da medição de pressões em modelos de eclusas de navegação. 1986. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

DUTRA, T. O. Critérios de Projeto Hidráulico de Eclusas de Navegação: Pressões Médias nos Condutos de Enchimento e Esvaziamento. 2014 112f. Trabalho de Graduação em Engenharia Hídrica Universidade Federal de Pelotas, Pelotas

Eletrobrás, (2003) Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Eletrobrás. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. 279f. 2003.

ERBISTE, P.C.F. Comportas Hidráulicas. Editora Campus/Eletrobrás, Rio de Janeiro: 1987.

FINGER, G. R. Esforços Sobre Amarrações Das Embarcações em Eclusas – Elaboração de um Sistema de Mediação de Esforços –. 2012. 105 f Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

GRAHAM J. R. et al Article Erosion of Concrete in Hydraulic Structures. 24p. Reported by ACI Committee 210, ACI 210R-93, 1998.

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 out. 2013.

KAERCHER, André Loeblein. Estudo De Vibrações Induzidas Por Vórtices Em Estruturas Cilíndricas Submetidas A Escoamento Permanente. 2007. 187f. Dissertação de Mestrado Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

KEMPKA, Mariane Estimativa da Distribuição Longitudinal das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida. 2014. 91f. Dissertação de Mestrado Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

KEMPKA, Mariane. Determinação das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida: Aplicação em Eclusas de Navegação. 2011. 95f. Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. MT. Secretaria de Política Nacional de Transportes – SPNT/MT Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT (Plano Nacional de Logísticas e Transportes. 2012. Brasília

Ministério Do Meio Ambiente. MMA. Plano Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC (2008) Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_nacional_mudanca_clima.pdf Acessado em: 15 Dez. 2013

NOBORU MINEI. Eclusas ,Portos, Rios e Canais. OH4. Disponível em: <http://prezi.com/s46uqq1wpxx6/2013-08-16-oh4-eclusas/> Acesso em: 16 Ago. 2013

PALAURO, C. Análise das pressões mínimas a jusante de comporta segmento invertida em eclusas de navegação. 2012. 96 f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PICKERING, G.A. Lock culvert valve loss coeficient; Hydraulic model investigation. WES TR HL-81-10. 1981.

PLEC, Denis Fürstenau. Otimização De Leis De Manobras De Comportas De Eclusas De Navegação Com Uso De Algoritmo Genético. 2010. 178f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal De Minas Gerais Programa De Pós-Graduação Em Saneamento, Meio Ambiente E Recursos Hídricos, Belo Horizonte.

Porto. Rodrigo de Melo - Hidráulica Básica. 4ª. edição São Carlos: EESC-USP, 2006 (p. 222)

PORTUGAL. Ministério da Habitação de Obras Públicas – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Critérios para dimensionamento hidráulico de barragens descarregadoras. Memória n. 556. Lisboa, 1981.

ROMAGNOLI, M. Avaliação experimental da vibração induzida sobre uma comporta plana com descarga de fundo. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre: 2005.

SANTOS, S. R. Projeto Hidráulico de Eclusas de Alta Queda. 1998. 225 f. Texto (Título de Professor Livre Docente) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTOS, J. B. V. Influência nas características do escoamento em função da alteração da geometria do conduto a jusante de válvula tipo segmento invertida em sistema de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação. 2012. 62 f.

Dissertação de Mestrado. Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

SHARMA, H.R. Air-entrainment in high head gated conduits. Journal of Hydraulic Division. Novembro, 1976.

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.

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. XXVIII IAHR Congress. 1999.

SILVA, João Pedro Henriques da. Esforços Hidrodinâmicos em Comportas Verticais (Downpull). 2011. 126f. Instituto Superior De Engenharia De Lisboa Departamento de Engenharia Mecânica. Lisboa.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydraulic Design of Navigation Locks. EM 1110-2-1604. 2006. Disponível em: http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1604.pdf Acesso em: 09 out 2013.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Planning and Design of Navigation Locks. EM 1110-2-2602. 1995. Disponível em: <http://planning.usace.army.mil/toolbox/library/EMs/em1110.2.2602.pdf> Acesso em: 08 ago. 2013.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Lock Culvert valves; hydraulic design considerations. ERDC/CHL TR-11-4. 2011. Disponível em http://operations.usace.army.mil/nav/14OctTech/02%20Lock_Valves_Tech_Exchange_Oct2014.pdf Acesso em: 05 Nov 2013.

USSAMI, H. Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação. 1980. 198 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Universidade Federal do Pará, Imagem Eclusas. Disponível em: <http://www.jornalbeiradorio.ufpa.br/novo/images/beiradorio/beira88/eclusas.jpg> Acesso em: 20mar2016.

Anexo A - Distribuição Longitudinal das Pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% para a base do conduto

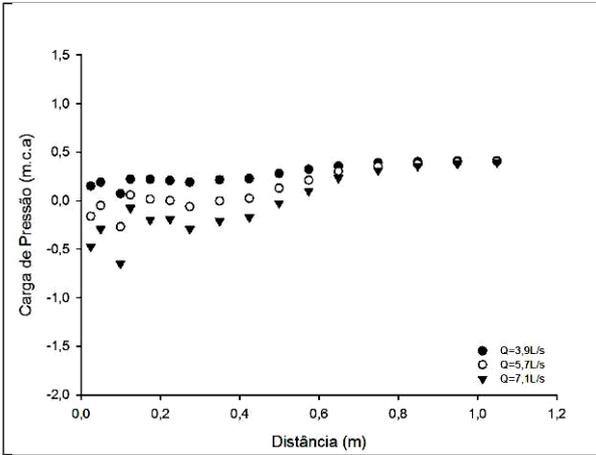


Figura 141 – Pressão 0,1% na base (a=10%)

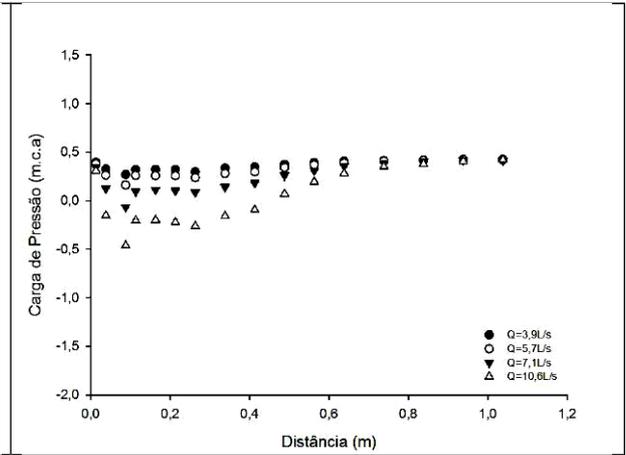


Figura 142 – Pressão 0,1% na base (a=20%)

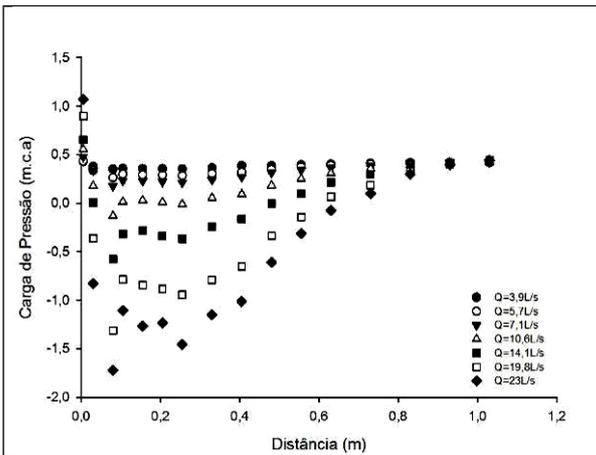


Figura 143 – Pressão 0,1% na base (a=30%)

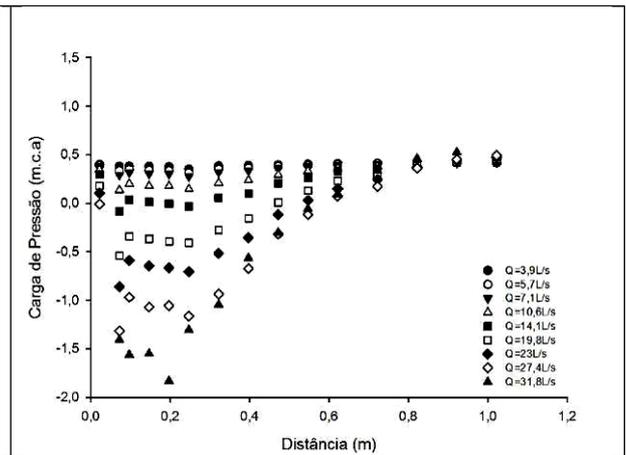


Figura 144 – Pressão 0,1% na base (a=40%)

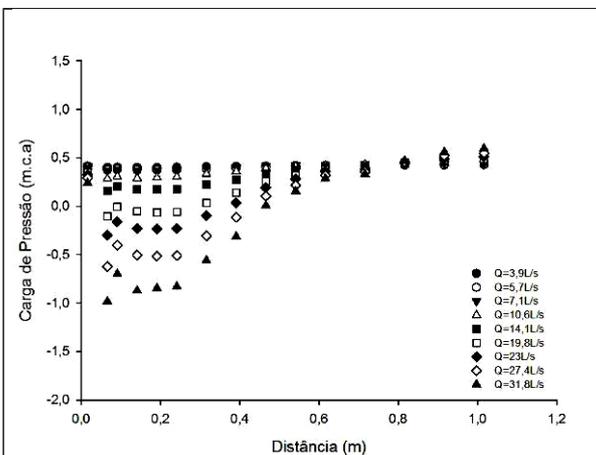


Figura 145 – Pressão 0,1% na base (a=50%)

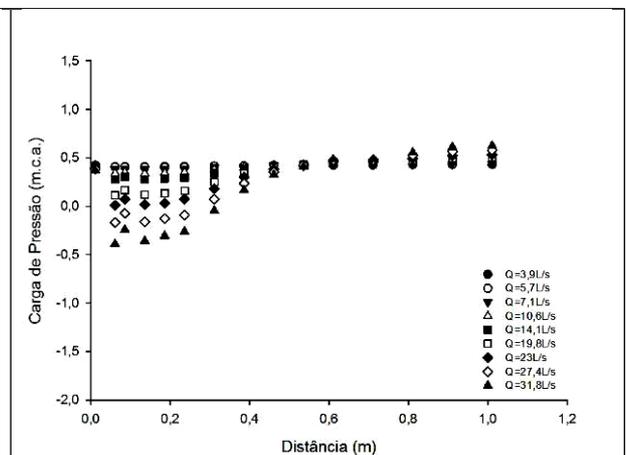
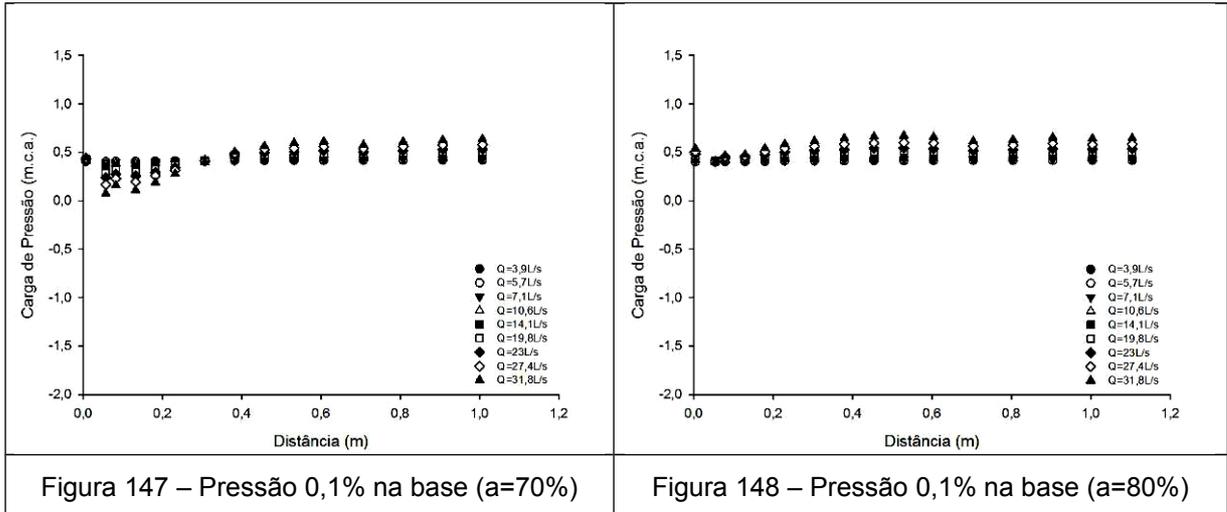


Figura 146 – Pressão 0,1% na base (a=60%)



Após a análise das figuras apresentadas, observa-se que o comportamento característico das pressões apresentado até aqui se repete, porém com pressões ainda menores que as apresentadas para base. Percebe-se também que:

- bem como as análises apresentadas por Kempka (2014) e Battiston (2013), neste estudo também é possível verificar, com facilidade, a influência do grau de abertura da comporta sob o escoamento. É nítida a zona de influência, pois existe uma redução das pressões na região logo após a comporta, sendo que a medida que o escoamento se afasta dessa zona de influência, as pressões tendem a subir até encontrar uma estabilidade;
- o comportamento das pressões $P_{0,1\%}$ segue a mesma tendência das pressões médias, no entanto observa-se que os valores são ainda menores;
- as pressões $P_{0,1\%}$ gradualmente vão ficando menores até a abertura de 40% onde temos a maior amplitude dos dados e logo após na abertura de 50% já apresenta aumento do valor pressão e segue gradualmente se aproximando de zero até a abertura de 80%, onde apresenta linearidade próxima à zero;
- existe uma região, onde se concentram as pressões mais baixas, no trecho do aqueduto entre 0,1m e 0,6m, que exigem mais atenção;
- o menor valor de pressão $P_{0,1\%}$ ocorreu para a abertura de 40% e vazão de 31,8L/s;

- f) quanto maior vazão menores as pressões $P_{0,1\%}$ obtidas, na região onde ocorrem as pressões mínimas, para um mesmo grau de abertura da comporta;
- g) o efeito da perda de carga linear prevalece ao final do aqueduto, onde a influência da comporta termina, mantendo as pressões $P_{0,1\%}$ praticamente constantes e iguais ao nível de jusante.

Anexo B - Distribuição Longitudinal das Pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% para o teto do conduto

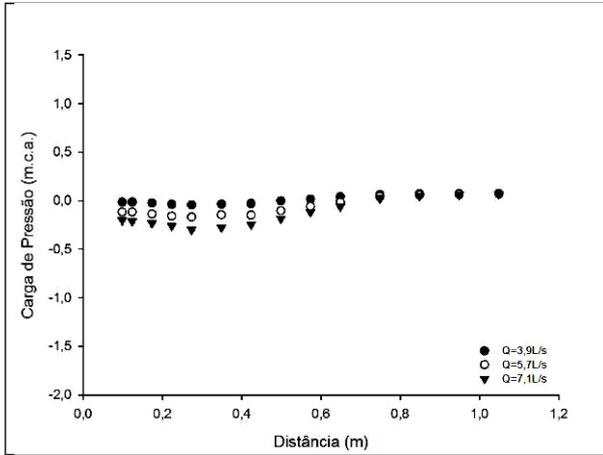


Figura 149 – Pressão 0,1% no teto (a=10%)

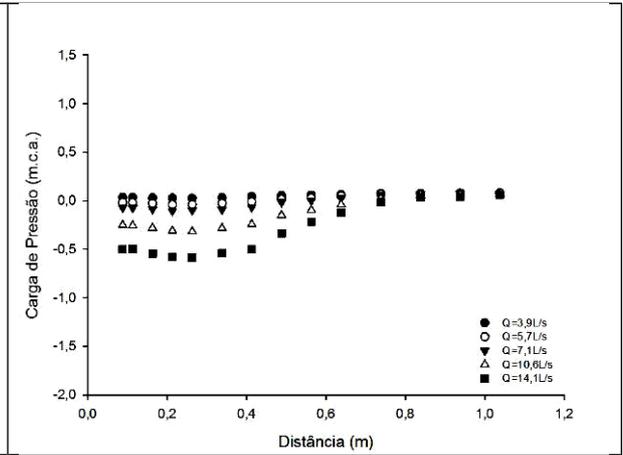


Figura 150 – Pressão 0,1% no teto (a=20%)

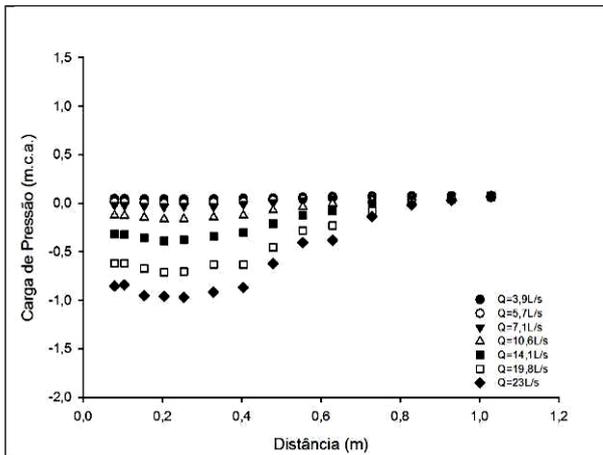


Figura 151 – Pressão 0,1% no teto (a=30%)

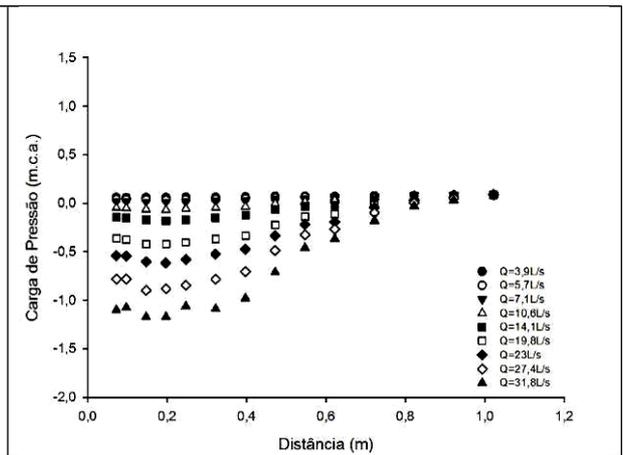


Figura 152 – Pressão 0,1% no teto (a=40%)

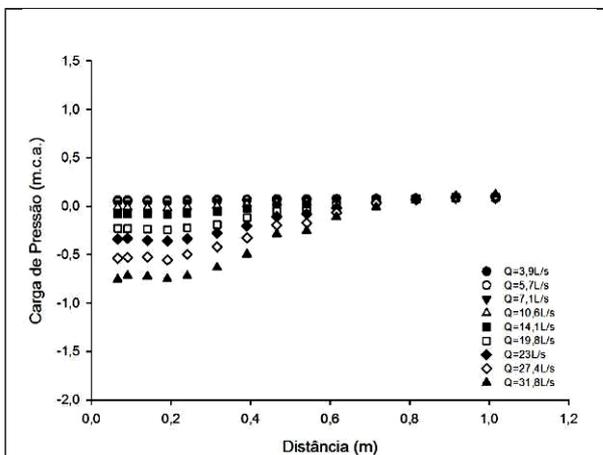


Figura 153 – Pressão 0,1% no teto (a=50%)

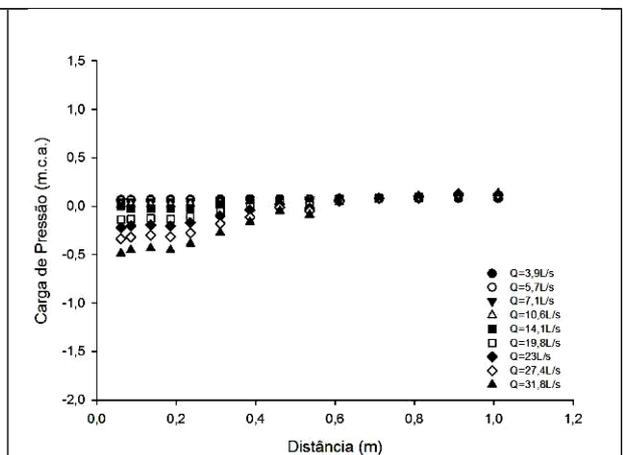


Figura 154 – Pressão 0,1% no teto (a=60%)

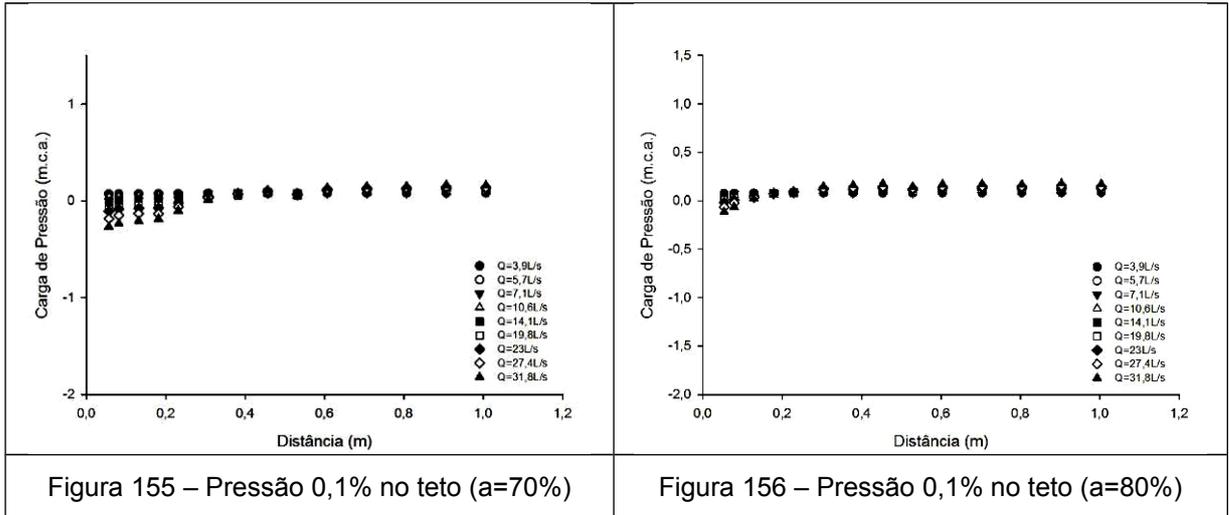


Figura 155 – Pressão 0,1% no teto (a=70%)

Figura 156 – Pressão 0,1% no teto (a=80%)

Após a análise das figuras apresentadas observa-se que:

- o comportamento das pressões $P_{0,1\%}$ segue a mesma tendência das pressões médias, no entanto observa-se que os valores são um pouco menores;
- as pressões $P_{0,1\%}$ gradualmente vão ficando menores até a abertura de 40% onde temos a maior amplitude dos dados e logo após na abertura de 50% já apresenta aumento do valor pressão e segue gradualmente se aproximando de zero até a abertura de 80%, onde apresenta linearidade próxima à zero;
- existe uma região, onde se concentram as pressões mais baixas, no trecho do aqueduto entre 0,1m e 0,6m, que exigem mais atenção;
- o menor valor de pressão $P_{0,1\%}$ ocorreu para a abertura de 40% e vazão de 31,8L/s;
- os valores das pressões $P_{0,1\%}$ são inversamente proporcionais às vazões, ou seja, se a vazão aumenta, o valor da pressão média diminui na região onde ocorrem as pressões mínimas, para uma mesma abertura;
- as pressões $P_{0,1\%}$, após o término da influência da comporta, ficam praticamente constantes e iguais ao nível de jusante, a partir deste momento tem-se, apenas, o efeito da perda de carga linear.

Anexo C - Distribuição Longitudinal dos Coeficientes de Pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% para a base do conduto

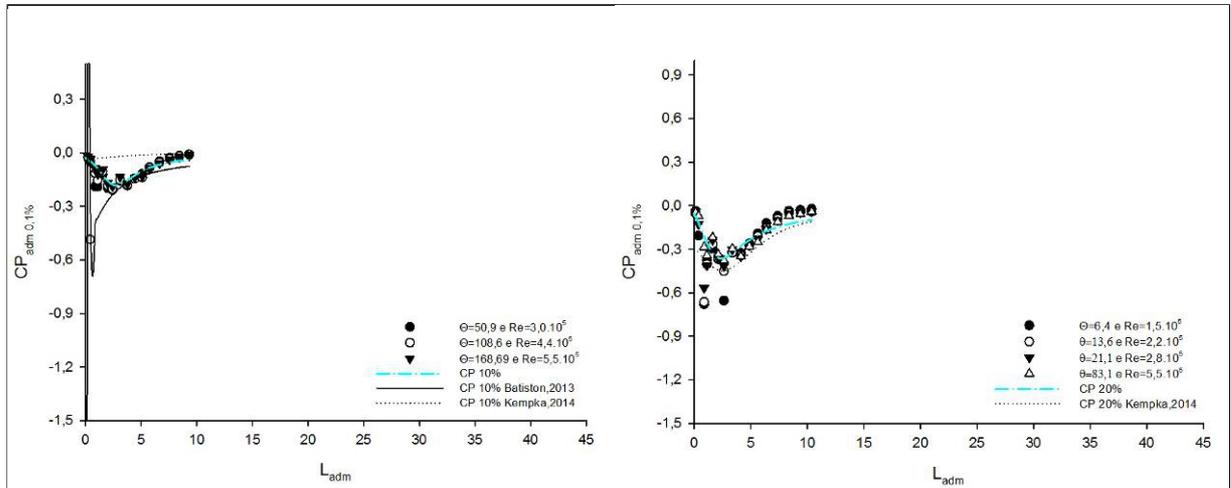


Figura 157 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=10\%$)

Figura 158 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=20\%$)

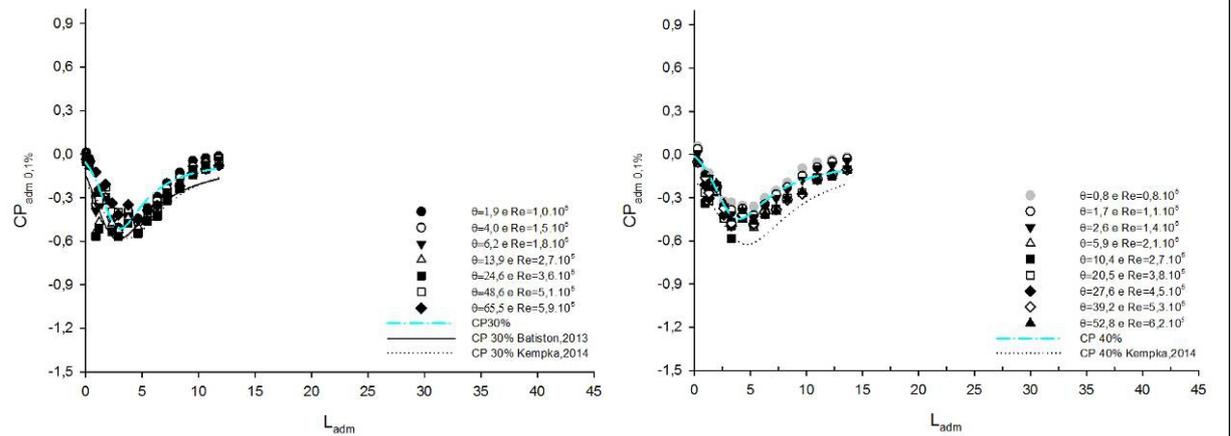


Figura 159 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=30\%$)

Figura 160 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=40\%$)

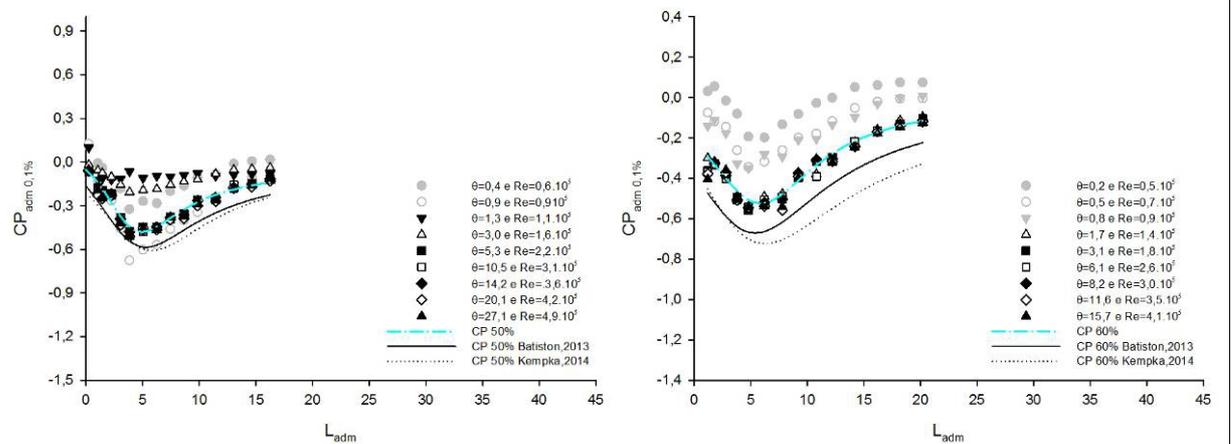
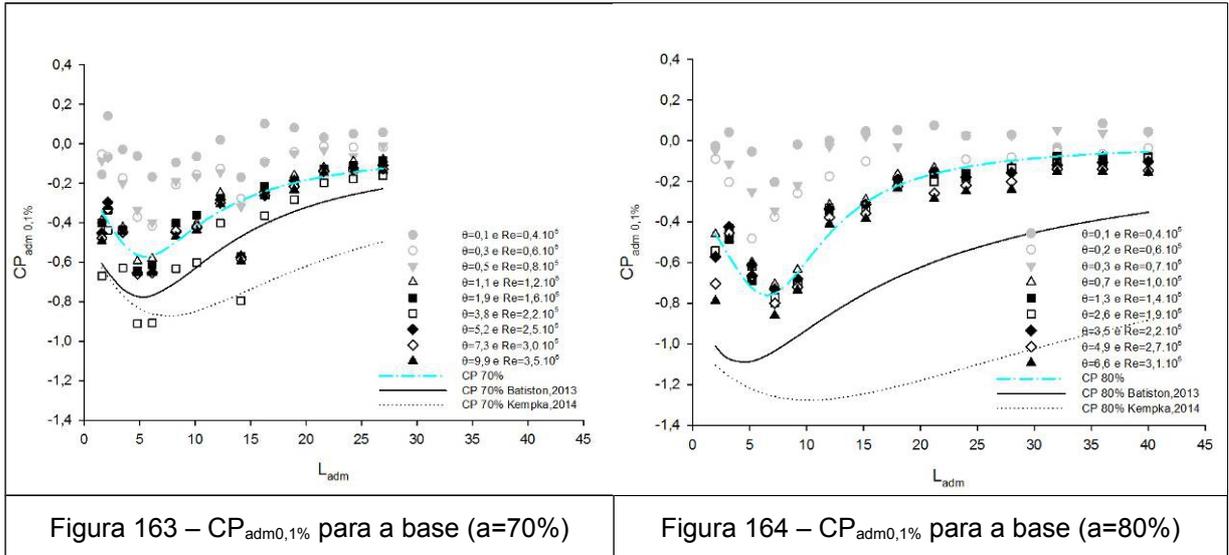


Figura 161 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=50\%$)

Figura 162 – $CP_{adm0,1\%}$ para a base ($a=60\%$)



A partir da análise das figuras percebe-se que:

- a) foi possível observar que as variações dos coeficientes adimensionais junto à base do conduto foram influenciadas pela abertura da comporta e pela vazão, sendo que as maiores variações de pressão na base foram se afastando da comporta conforme aumentou a abertura da comporta;
- b) o comportamento dos coeficientes adimensionais para $P_{0,1\%}$ segue a mesma tendência geral das pressões médias;
- c) o menor valor dos coeficientes adimensionais para $P_{0,1\%}$ ocorreu para a abertura de 20% e vazão de 5,7L/s;
- d) os coeficientes mínimos adimensionais para $P_{0,1\%}$ ocorrem logo a jusante da comporta e depois tendem aumentar conforme aumenta a distância da comporta;
- e) quanto maior vazão menores os valores de $CP_{0,1\%}$ obtidos, na região das onde ocorrem as pressões mínimas, para um mesmo grau de abertura da comporta;
- f) o efeito da perda de carga linear prevalece ao final do aqueduto, onde a influência da comporta termina, mantendo os valores de $CP_{0,1\%}$ praticamente constantes e iguais ao nível de jusante.

Anexo D - Distribuição Longitudinal dos Coeficientes de Pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% para o teto do conduto

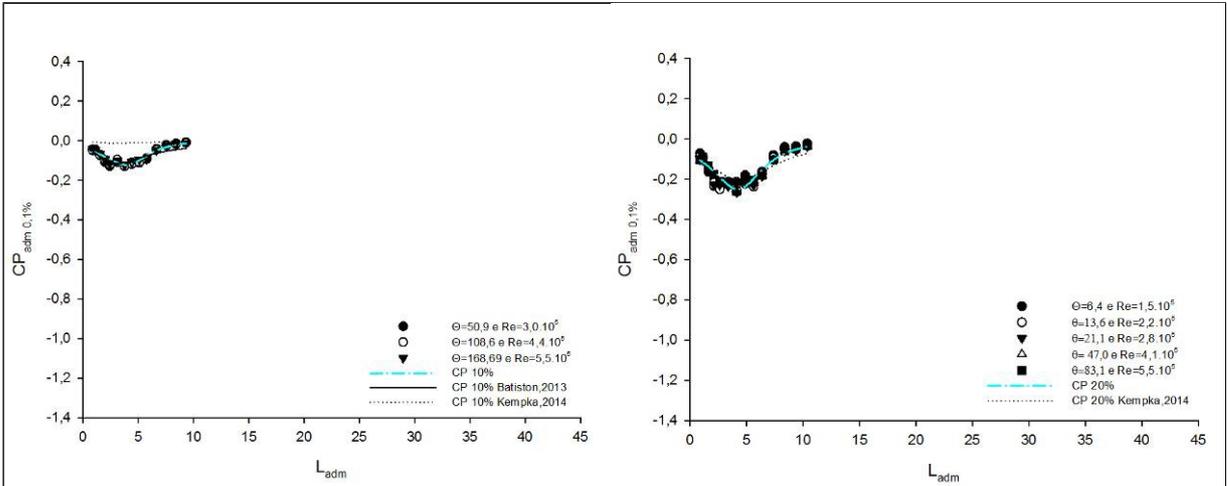


Figura 165 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=10\%$)

Figura 166 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=20\%$)

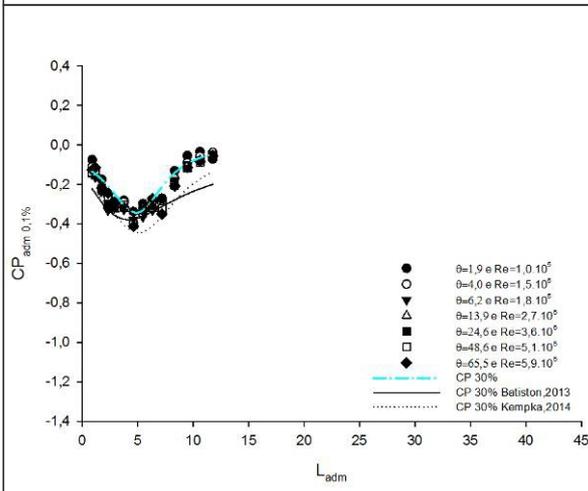


Figura 167 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=30\%$)

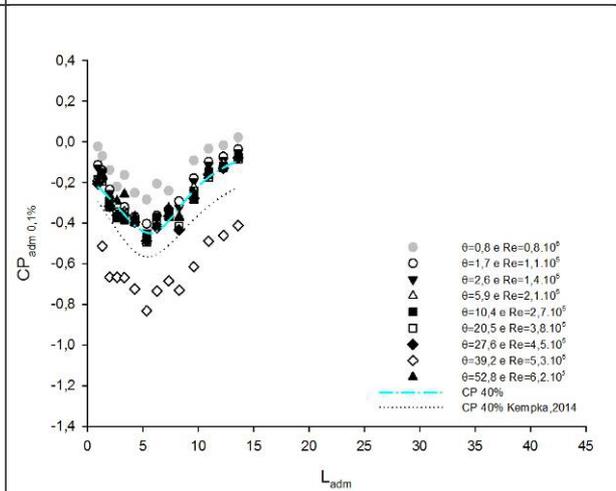


Figura 168 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=40\%$)

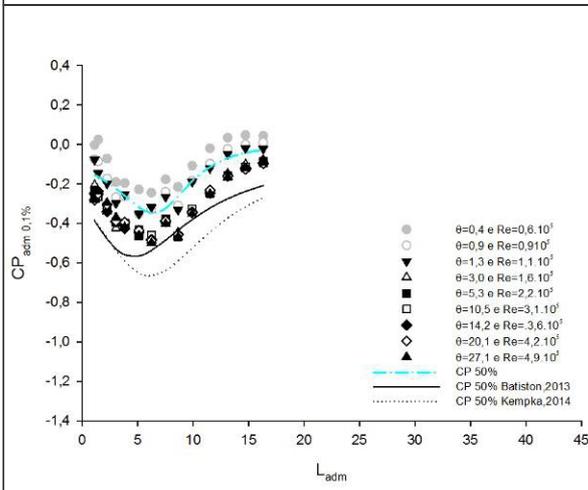


Figura 169 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=50\%$)

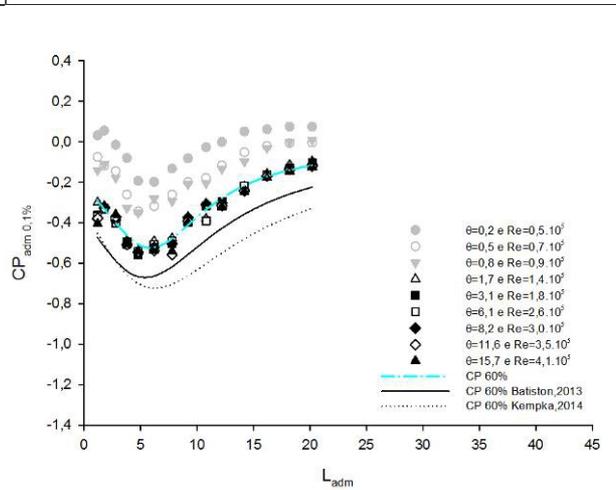


Figura 170 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=60\%$)

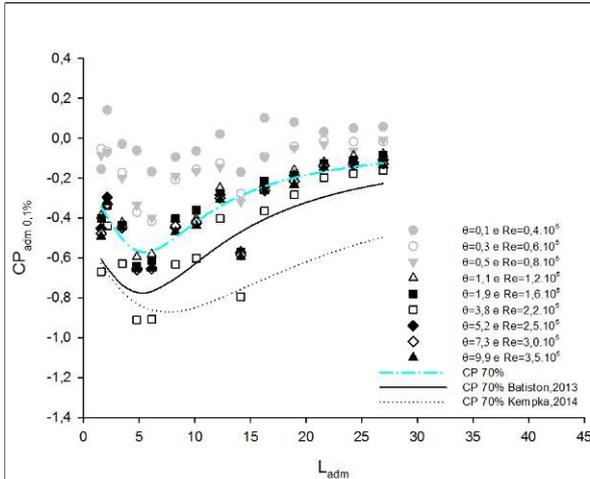


Figura 171 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=70\%$)

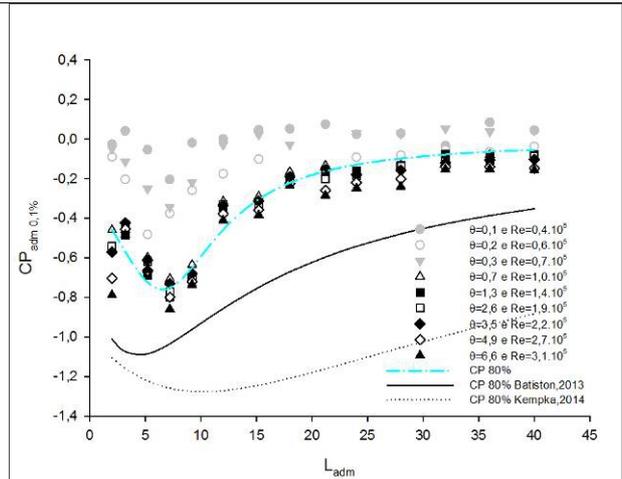


Figura 172 – $CP_{adm0,1\%}$ para o teto ($a=80\%$)

A partir da análise das figuras percebe-se que:

- a) a variação dos coeficientes adimensionais junto ao teto do aqueduto foi influenciada pela abertura da comporta e pela vazão, sendo que as maiores variações dos coeficientes adimensionais de pressão no teto foram se afastando da comporta conforme aumentou a abertura da comporta;
- b) o comportamento dos coeficientes adimensionais para $P_{0,1\%}$ segue a mesma tendência geral das pressões médias;
- c) o menor valor dos coeficientes adimensionais para $P_{0,1\%}$ ocorreu para a abertura de 70% e vazão de 19,8L/s;
- d) os coeficientes mínimos adimensionais para $P_{0,1\%}$ ocorrem logo a jusante da comporta e depois tendem aumentar conforme aumenta a distância da comporta;
- e) quanto maior vazão menores os valores de $CP_{0,1\%}$ obtidos, na região das onde ocorrem as pressões mínimas, para um mesmo grau de abertura da comporta;
- f) o efeito da perda de carga linear prevalece ao final do aqueduto, onde a influência da comporta termina, mantendo os valores de $CP_{0,1\%}$ praticamente constantes e iguais ao nível de jusante.