

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental

ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES  
A JUSANTE DE COMPORTAS TIPO SEGMENTO INVERTIDA

Eng. Mariane Kempka

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre, fevereiro, 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**Eng. Mariane Kempka**

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

**Orientador: Marcelo Giulian Marques**

**Banca Examinadora:**

**Prof. PhD. Jorge Saldanha Matos**

**Prof. PhD. Éder Daniel Teixeira**

**Prof. Dr. Mauricio Dai Prá**

**Prof. PhD. Luiz Augusto Magalhães Endres**

Porto Alegre, fevereiro, 2014.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me conceder a oportunidade de chegar até aqui.

Aos meus pais, Lidio e Silvia Kempka, os grandes incentivadores que não mediram esforços para que este sonho se tornasse realidade.

À minha amada madrinha Carla Wottrich.

Ao meu noivo, Rodrigo Scapinello, por sua dedicação, compreensão, por seu amor.

À minhas amigas especiais: Lidiana Aparecida Biasi, que mesmo distante esteve presente, Marina Bellaver Corte que desde a graduação sempre foi incentivadora e a Joice Kuritza que foi a grande encorajadora para esta defesa.

A todos os colegas de laboratório por tornarem esta caminhada mais fácil, em especial ao bolsista de iniciação científica Thiago Bohn.

Aos colegas Leandro do Espírito Santo Soares e ao Mestre Engenheiro João Gerdau de Borja, pelas discussões, colaborações, por vossa amizade.

Ao colega e amigo Engenheiro Mestre Alexandre Augusto Mees Alves.

Ao Professor Marcelo Giulian Marques, por sua dedicação, seus esforços e por sua inquestionável orientação.

Ao Professor Mauricio Daí Prá por sua grande ajuda nas leituras dos textos, elaboração de artigos e discussões ao longo desta caminhada.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pela oportunidade de cursar esta Pós-Graduação.

À Furnas Centrais Elétricas pelo apoio concedido.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudos.

# CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Setor hidroviário no Brasil.....	16
1.2	Setor hidroenergético no Brasil.....	18
2	DIRETRIZES DA PESQUISA .....	20
2.1	Objetivos.....	20
2.2	Demais objetivos.....	20
2.3	Delineamento .....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
3.1	Eclusas .....	22
3.1.1	Tipos de eclusas.....	24
3.1.2	Componentes de uma eclusa.....	25
3.1.3	Eclusas de alta queda.....	26
3.1.4	Comportas segmento em eclusas .....	27
3.2	Cavitação .....	30
3.2.1	Cavitação em eclusas de navegação .....	32
3.2.2	Potencial de Cavitação.....	33
3.2.3	Medidas atenuantes quando da ocorrência de cavitação.....	35
3.2.4	Coefficiente de contração.....	37
3.3	Previsão da distribuição longitudinal das pressões a jusante de comporta segmento invertida .....	39
3.3.1	Verificação experimental.....	39
3.3.2	Simulação Numérica.....	43
4	METODOLOGIA DE PESQUISA .....	47
5	ANÁLISE DE DADOS .....	52
5.1	Comportamento das pressões médias.....	52
5.1.1	Comportamento das pressões médias na base do conduto.....	52
5.1.2	Comportamento das pressões médias no teto do conduto.....	55
5.2	Pressões médias mínimas.....	59
5.3	Verificação e análise dos adimensionais <b>CP</b> e <b>Ladm</b> .....	60
5.3.1	Verificação e análise para as pressões na base da galeria.....	60
5.3.2	Verificação e análise para as pressões no teto da galeria.....	64
5.4	Comportamento das pressões mínimas, $P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$ .....	71
5.4.1	Comportamento das pressões 1% na base do conduto.....	71
5.4.2	Comportamento das pressões 1% no teto do conduto.....	74
5.4.3	Comportamento das pressões 0,1% na base do conduto.....	77
5.4.4	Comportamento das pressões 0,1% no teto do conduto.....	80
5.5	Verificação e análise dos adimensionais <b>CP1%</b> , <b>CP0,1%</b> e <b>Ladm</b> .....	84
5.5.1	Verificação e análise para as pressões $P_{1\%}$ na base da galeria .....	84
5.5.2	Verificação e análise para as pressões $P_{1\%}$ no teto da galeria .....	88
5.5.3	Verificação e análise para as pressões 0,1% na base da galeria.....	92
5.5.4	Verificação e análise para as pressões 0,1% no teto da galeria .....	96
5.6	Comportamento e análise dos adimensionais CP para pressões na abertura de 100% da comporta.....	101
6	CONCLUSÕES.....	107
6.1	Verificação da metodologia proposta por Battiston (2013). .....	107
6.2	Comportamento das pressões.....	107

6.3	Resultados acerca dos adimensionais de pressão.....	108
6.4	Comportamento e análise dos adimensionais CP para pressões na abertura de 100% da comporta.....	109
7	RECOMENDAÇÕES.....	110
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	111
9	ANEXOS.....	114
9.1	Pressões obtidas na base da galeria.....	114
9.2	Pressões obtidas no teto da galeria.....	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Parâmetros de eficiência energética, consumo de combustível e emissões por modal. ....	17
Figura 2 – Eclusa de Tucuruí.....	22
Figura 3 – Funcionamento esquemático de uma eclusa .....	23
Figura 4 – Comporta segmento, quando utilizadas em descarregadores os braços radiais funcionam à compressão. ....	28
Figura 5 – Comporta tipo segmento, utilizada na posição invertida, os braços radiais funcionam sob regime de tração. ....	28
Figura 6 – Novas geometrias simuladas por Shengyi et al. (2005). ....	36
Figura 7 – Vena contracta: região de maior velocidade e menores pressões.....	37
Figura 8 – Coeficientes de contração na comporta segmento invertida para diferentes autores.....	38
Figura 9 – Pressões medidas em 3 diferentes posições a jusante da comporta para o teto do conduto com velocidade de abertura da comporta de 3,6mm/s, em modelo. ....	41
Figura 10 – Curvas finais dos coeficientes adimensionais para a base do conduto.....	42
Figura 11 – Curvas finais dos coeficientes adimensionais para o teto do conduto.....	43
Figura 12 – Campos de pressão para diferentes condições de expansão.(abertura = 30 % e vazão = 0,18 m <sup>3</sup> /s.).....	44
Figura 13 – Campos de pressão para vazão de 90l/s e diferentes porcentagens de abertura. ....	45
Figura 14 – Comparação entre o resultado da simulação numérica com o obtido em modelo físico reduzido na condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.....	45
Figura 15 – Pressão média, em mca, para abertura de 60%. No eixo das abscissas tem-se a posição e no eixo das ordenadas a altura do conduto. ....	46
Figura 16 – Modelo físico utilizado para os ensaios da presente pesquisa. ....	47
Figura 17 - Principais variáveis envolvidas.....	47
Figura 18 – Detalhe da comporta do modelo na ocasião de ensaio com corante.....	49
Figura 19 – Mapa da localização dos transdutores. ....	51
Figura 20 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 10% de abertura.....	53
Figura 21 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 20% de abertura.....	53
Figura 22 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 30% de abertura.....	53
Figura 23 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 40% de abertura.....	53
Figura 24 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 50% de abertura.....	54
Figura 25 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 60% de abertura.....	54
Figura 26 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 70% de abertura.....	54
Figura 27 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 80% de abertura.....	54
Figura 28 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 10% de abertura.....	56
Figura 29 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 20% de abertura.....	56
Figura 30 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 30% de abertura.....	56
Figura 31 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 40% de abertura.....	56
Figura 32 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 50% de abertura.....	57
Figura 33 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 60% de abertura.....	57
Figura 34 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 70% de abertura.....	57
Figura 35 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 80% de abertura.....	57

Figura 36 – Comportamento das pressões médias, no teto da galeria, para vazão de 32 l/s e diferentes aberturas da comporta.....	58
Figura 37 – Pressão média mínima registrada na base do conduto pra cada porcentagem de abertura em função da vazão. ....	59
Figura 38 – Pressão média mínima registrada no teto do conduto pra cada porcentagem de abertura em função da vazão. ....	59
Figura 39 – Simulações e seus respectivos números de Reynolds característicos.....	60
Figura 40 – CP na base para abertura de 10% da comporta. ....	61
Figura 41 – CP na base para abertura de 20% da comporta. ....	61
Figura 42 – CP na base para abertura de 30% da comporta. ....	61
Figura 43 – CP na base para abertura de 40% da comporta. ....	61
Figura 44 – CP na base para abertura de 50% da comporta. ....	62
Figura 45 – CP na base para abertura de 60% da comporta. ....	62
Figura 46 – CP na base para abertura de 70% da comporta. ....	62
Figura 47 – CP na base para abertura de 80% da comporta. ....	62
Figura 48 – Curvas finais para CP de diferentes porcentagens de abertura.....	63
Figura 49 – CP no teto para abertura de 10% da comporta. ....	65
Figura 50 – CP no teto para abertura de 20% da comporta. ....	65
Figura 51 – CP no teto para abertura de 30% da comporta. ....	65
Figura 52 – CP no teto para abertura de 40% da comporta. ....	65
Figura 53 – CP no teto para abertura de 50% da comporta. ....	66
Figura 54 – CP no teto para abertura de 60% da comporta. ....	66
Figura 55 – CP no teto para abertura de 70% da comporta. ....	66
Figura 56 – CP no teto para abertura de 80% da comporta. ....	66
Figura 57 – Curvas finais para CP de diferentes porcentagens de abertura no teto do conduto.....	67
Figura 58 – Coeficientes mínimos para a base em função da porcentagem de abertura.....	69
Figura 59 – Coeficientes mínimos para o teto em função da porcentagem de abertura. ....	69
Figura 60 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores , na base do conduto, para abertura de 10%. ....	72
Figura 61 – Comportamento das pressões 1%, de serem inferiores na base do conduto, para abertura de 20%. ....	72
Figura 62 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 30%. ....	72
Figura 63 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 40%. ....	72
Figura 64 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 50%. ....	73
Figura 65 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 60%. ....	73
Figura 66 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 70%. ....	73
Figura 67 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 80%. ....	73
Figura 68 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 10%. ....	75
Figura 69 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 20%. ....	75
Figura 70 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 30%. ....	75
Figura 71 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 40%. ....	75
Figura 72 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 50%. ....	76
Figura 73 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 60%. ....	76
Figura 74 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 70%. ....	76
Figura 75 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 80%. ....	76
Figura 76 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 10%. ....	78
Figura 77 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 20%. ....	78
Figura 78 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 30%. ....	78
Figura 79 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 40%. ....	78
Figura 80 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 50%. ....	79
Figura 81 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 60%. ....	79
Figura 82 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 70%. ....	79
Figura 83 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 80%. ....	79
Figura 84 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 10%. ....	81



Figura 85 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 20% .	81
Figura 86 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 30% .	81
Figura 87 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 40% .	81
Figura 88 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 50% .	82
Figura 89 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 60% .	82
Figura 90 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 70% .	82
Figura 91 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 80% .	82
Figura 92 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 10% da comporta .	85
Figura 93 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 20% da comporta .	85
Figura 94 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 30% da comporta .	85
Figura 95 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 40% da comporta .	85
Figura 96 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 50% da comporta .	86
Figura 97 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 60% da comporta .	86
Figura 98 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 70% da comporta .	86
Figura 99 – CP <sub>1%</sub> na base para abertura de 80% da comporta .	86
Figura 100 – Curvas finais para CP <sub>1%</sub> para diferentes percentagens de abertura na base do conduto .	87
Figura 101 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 10% da comporta .	89
Figura 102 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 20% da comporta .	89
Figura 103 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 30% da comporta .	89
Figura 104 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 40% da comporta .	89
Figura 105 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 50% da comporta .	90
Figura 106 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 60% da comporta .	90
Figura 107 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 70% da comporta .	90
Figura 108 – CP <sub>1%</sub> no teto para abertura de 80% da comporta .	90
Figura 109 – Curvas finais para CP <sub>1%</sub> para diferentes percentagens de abertura no teto do conduto .	91
Figura 110 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 10% da comporta .	93
Figura 111 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 20% da comporta .	93
Figura 112 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 30% da comporta .	93
Figura 113 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 40% da comporta .	93
Figura 114 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 50% da comporta .	94
Figura 115 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 60% da comporta .	94
Figura 116 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 70% da comporta .	94
Figura 117 – CP <sub>0,1%</sub> na base para abertura de 80% da comporta .	94
Figura 118 – Curvas finais para CP <sub>0,1%</sub> para diferentes percentagens de abertura na base do conduto .	95
Figura 119 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 10% da comporta .	97
Figura 120 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 20% da comporta .	97
Figura 121 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 30% da comporta .	97
Figura 122 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 40% da comporta .	97
Figura 123 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 50% da comporta .	98
Figura 124 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 60% da comporta .	98
Figura 125 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 70% da comporta .	98
Figura 126 – CP <sub>0,1%</sub> no teto para abertura de 80% da comporta .	98
Figura 127 – Curvas finais para CP <sub>0,1%</sub> para diferentes percentagens de abertura no teto do conduto .	99
Figura 128 – Comportamento das pressões médias, na base da galeria .	101
Figura 129 – Comportamento das pressões P <sub>1%</sub> , na base da galeria .	102
Figura 130 – Comportamento das pressões médias, no teto da galeria .	102
Figura 131 – Comportamento das pressões P <sub>1%</sub> , no teto da galeria .	102
Figura 132 – Comportamento das pressões P <sub>0,1%</sub> , na base da galeria .	103
Figura 133 – Comportamento das pressões P <sub>0,1%</sub> , no teto da galeria .	103
Figura 134 – CP*100% para a base da galeria .	104
Figura 135 – CP*100% para o teto da galeria .	104
Figura 136 – CP* <sub>1%</sub> para a base da galeria .	105
Figura 137 – CP* <sub>0,1%</sub> para a base da galeria .	105
Figura 138 – CP* <sub>1%</sub> para o teto da galeria .	106
Figura 139 – CP* <sub>0,1%</sub> para o teto da galeria .	106

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Eclusas de alta queda brasileiras.....	26
Quadro 2 – Conjunto de equações propostas por Kempka (2011). ....	39
Quadro 3 – Vazões e aberturas simuladas em modelo físico por Battiston, (2013). ....	42
Quadro 4 – Características dos transdutores de pressão. ....	48
Quadro 5 – Resumo dos ensaios.....	49
Quadro 6 – Coeficiente para a equação 9 para obtenção do valor de CP para a base da galeria. ....	64
Quadro 7 – Coeficiente para a equação 10 para obtenção do valor de CP para o teto da galeria. ....	68
Quadro 8 – Coeficientes CP mínimo dos ajustes para a base.....	70
Quadro 9 – Coeficientes CPmínimo dos ajustes para o teto.....	70
Quadro 10 – Coeficiente para a equação 13 para obtenção do valor de CP <sub>1%</sub> para a base da galeria.....	88
Quadro 11 - Coeficiente para a equação 14 para obtenção do valor de CP <sub>1%</sub> para o teto da galeria. ....	92
Quadro 12 - Coeficiente para a equação 15 para obtenção do valor de CP <sub>0,1%</sub> para a base da galeria .....	96
Quadro 13 - Coeficiente para a equação 16 para obtenção do valor de CP <sub>0,1%</sub> para a base da galeria .....	100
Quadro 14 – Menores pressões registradas na presente pesquisa. ....	108
Quadro 15 – Valores mínimo dos adimensionais de pressão para a base e o teto da galeria.....	109

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_v$  = Altura da vena contracta [L]

$a$  = Abertura da comporta [L]

$A$  = Menor área (efetiva) do escoamento a jusante da comporta [ $L^2$ ]

$A_M$  = Parâmetro adimensional proposto por Kempka, (2011) [1]

$c$  = Celeridade [ $LT^{-1}$ ]

$C_c$  = Coeficiente de contração [1]

$CP$  = Coeficiente de pressão [1]

$C\bar{P}$  = Coeficiente de pressão média [1]

$CP_{1\%}$  = Coeficiente de pressão  $P_{1\%}$  [1]

$CP_{0,1\%}$  = Coeficiente de pressão  $P_{0,1\%}$  [1]

$CP_{100\%}^*$  = Coeficiente de pressão média para abertura de 100% da comporta [1]

$CP_{1\%}^*$  = Coeficiente de pressão 1% para abertura de 100% da comporta [1]

$CP_{0,1\%}^*$  = Coeficiente de pressão 0,1% para abertura de 100% da comporta [1]

$Cpk_{med}$  = Coeficiente de pressão média por Kempka, (2012) [1]

$Cpk_{1\%}$  = Coeficiente de pressão com probabilidade de 1% por Kempka, (2012) [1]

$Cpk_{0,1\%}$  = Coeficiente de pressão com probabilidade de 0,1% por Kempka, (2012) [1]

$D$  = Altura da seção transversal do conduto [L]

$e$  = Espessura do conduto [L]

$E$  = Módulo de elasticidade do material do conduto [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]

$g$  = Aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ]

$K$  = Parâmetro de cavitação [1]

$K_2$  = Módulo de elasticidade da água [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]

$l$  = Largura do aqueduto [L]

$L_{adm}$  = Adimensional de posição [1]

$L_i$  = Posição dos pontos de medição [L]

$L_{exp}$  = Comprimento de expansão [L]

$P$  = Pressão a jusante da comporta [L]

$P_{1\%}$  = Pressão a jusante da comporta com probabilidade de 99% de ser superada [L]

$P_{0,1\%}$  = Pressão a jusante da comporta com probabilidade de 99,9% de ser superada [L]

$P_{VG}$  = Pressão relativa de vapor do fluido [L]

$P_U$  = Pressão a montante da comporta [L]

$\bar{P}$  = Pressão média no ponto de medição [L]

$\bar{P}_{a100\%}$  = Pressão média no ponto de medição para 100% de abertura da comporta [L]

$Q$  = Vazão [ $L^3T^{-1}$ ]

$Re$  = Número adimensional de Reynolds [1]

$V$  = Velocidade média do escoamento [ $LT^{-1}$ ]

$V_a$  = Velocidade média na seção da comporta [ $LT^{-1}$ ]

$V_D$  = Velocidade média no conduto [ $LT^{-1}$ ]

$V_V$  = Velocidade na vena contracta [ $LT^{-1}$ ]

### **Letras especiais**

$\rho$  = Massa específica do líquido [ $ML^{-3}$ ]

$\sigma$  = Índice de cavitação [1]

$\mathcal{P}$  = Pressão a jusante da comporta [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]

$\mathcal{P}_{atm}$  = Pressão atmosférica [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]

$\mathcal{P}_{VG}$  = Pressão relativa de vapor do fluido [ $MT^{-2}L^{-1}$ ]

$\theta$  = Adimensional que relaciona a vazão com a geometria da galeria [1]

## RESUMO

O uso de comportas ou válvulas em condutos para efetuar o controle de fluxo em estruturas hidráulicas é bastante usual. Uma das aplicações deste tipo de dispositivo de controle de vazões é para fazer o enchimento e esvaziamento de câmaras de eclusas de navegação. Entretanto, a sua aplicação deve ser feita com cuidado em função da complexidade do escoamento, o qual pode apresentar grandes variações de velocidade e pressões junto à base e ao teto da galeria a jusante da comporta. O gradiente de pressão pode variar no tempo e no espaço podendo vir a ocasionar danos por erosão (desgaste) e/ou cavitação. Assim, torna-se fundamental obter critérios para a estimativa de previsão do valor dessas pressões para, então, poder inferir a possibilidade de danos junto à superfície sólida, permitindo que se determinem as condições críticas de operação que devem ser evitadas ou minimizadas durante as operações de esvaziamento ou de enchimento da câmara da eclusa. Esta pesquisa procura apresentar o estado da arte em relação à distribuição longitudinal das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida e os resultados e análises desenvolvidas em um modelo físico de laboratório. Estes estudos permitiram compreender o comportamento das pressões e verificar se o método sugerido por Batistton (2013), para estimar os valores da distribuição longitudinal das pressões junto à base e o teto da galeria a jusante da comporta, podem ser aplicados para todas as aberturas da comporta. As análises desenvolvidas consentiram observar que as situações críticas ocorrem para aberturas entre 40% e 60% e que as pressões mínimas ocorrem em uma distância adimensional ( $L_{adm}$ ) em torno de 2 a 6. Destaca-se que todos os resultados apresentados na presente pesquisa são válidos para coeficiente de pressão média para abertura de 100% da comporta,  $CP^*_{100\%}$ , entre 2,8 e 65,9.

Palavras-chave: Eclusas; Cavitação; Comporta Segmento Invertida; Pressões Médias.

## **ABSTRACT**

The practice of using of gates or valves in conduits to control the flow in hydraulic structures is a common one. One of the applications for this type of device is the flow control for filling and emptying navigation locks. However proper care should be taken when applying those due to the inherit complexity of the flows, which can present significant pressure and velocity fluctuation in the regions next to the floor and ceiling downstream of these gates. Fluctuations in the pressure gradients can cause damage by erosion and/or cavitation. For these reasons its of interest the understanding of criteria for the estimative of those pressures to then infer the possibility of damage in the solid boundaries, allowing the determination of critical operation conditions which to avoid or minimize during the emptying and filling operations of lock chambers. This research aims to present the state of art regarding the longitudinal pressure distribution downstream of inverted tainter gates and the results of experimental data obtained in a physical model. These study allowed to comprehend the behavior of the aforementioned pressures and to verify the method proposed by Battiston (2013) to estimate longitudinal pressure distributions next to the ceiling and floor of those types of structures. The developed analysis showed that the critical conditions occur in between the 40% and 60% opening and that the minimum pressures occur in between a dimensionless distance ( $L_{adm}$ ) 2 and 6. The presented results are valid for a mean pressure coefficient of 100% gate opening,  $CP*100\%$ , between 2,81 and 65,9.

**Key Words:** Locks; Cavitation; Tainter Gate, Medium Pressures.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta um imenso potencial para utilização da navegação fluvial, com 63 mil km de rios e lagos/lagoas, distribuídos em todo território nacional. Deste total, mais de 40 mil km são potencialmente navegáveis. No entanto, a navegação comercial ocorre somente em cerca de 13 mil km, com significativa concentração na bacia Amazônica, onde os rios não carecem de maiores investimentos e as populações não dispõem de muitas opções de modais terrestres (SECRETARIA DOS TRANSPORTES, 2010). Por outro lado, as regiões sul e sudeste, regiões de maior desenvolvimento industrial e social, onde se concentram os grandes centros consumidores, têm seus rios encaixados em vales com grandes desníveis. Esses desníveis são determinantes no processo de geração de energia, quando utilizadas hidrelétricas, porém a navegabilidade dos rios fica comprometida.

A principal dificuldade encontrada pela navegação nos cursos de águas naturais são os desníveis naturais como corredeiras, cachoeiras, etc. Na antiguidade, o único recurso para vencer esses obstáculos era a retirada das embarcações da água, contornando-se a queda, arrastando-se a embarcação sobre o solo ou em cima de roletes, procedimento adotado pelos bandeirantes no rio Tietê. (SILVA, 2012).

Diante do exposto, é necessário que se encontre um equilíbrio entre estes dois setores, o de transporte e o energético, pois o desenvolvimento e a inclusão social se dão mediante a disponibilidade tanto de energia quanto de transporte rápido, fácil e seguro. Isso proporciona, aos centros consumidores, produtos com preços mais competitivos, uma vez que o preço do transporte também encarece a mercadoria final. Dentro desse cenário, para que a construção de barragens e a navegabilidade dos rios sejam viáveis, usam-se estruturas denominadas eclusas. Tais estruturas de navegação são mecanismos que têm a função de promover, de forma segura, a transposição dos desníveis e auxiliar o desenvolvimento socioeconômico do país.

Esta pesquisa é justificada pela importância do assunto e devido ao cenário nacional, que é composto por uma vasta quilometragem de rios, grande potencial hidrelétrico e necessidade de expansão do transporte hidroviário. Além disto, está no Congresso Nacional o Projeto de Lei 209/2007, que torna obrigatória a construção de eclusas de navegação junto às barragens.

## 1.1 Setor hidroviário no Brasil

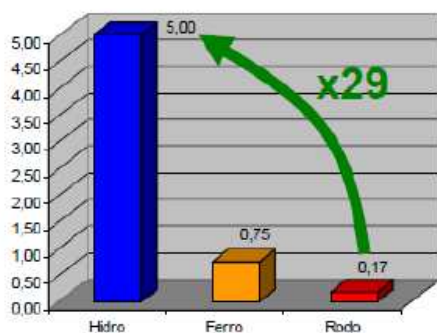
Até a década de 1970, o transporte rodoviário em função da sua rapidez e praticidade devido à malha rodoviária existente e impulsionado pelo crescimento da indústria automobilística foi o transporte que mais se desenvolveu no país, embora seja mais caro do que o ferroviário e o hidroviário. A participação das hidrovias na atual matriz de transporte de cargas é ainda modesta, cerca de 4%, quando comparada com o percentual de 58% do transporte rodoviário. Estimativas da Agência Nacional de Transportes Aquaviários - ANTAQ apontam que, atualmente, são transportadas pelas hidrovias brasileiras cerca de 45 milhões de toneladas de cargas/ano, enquanto o potencial identificado é pelo menos 4 vezes maior.

As hidrovias são o meio mais barato para transportar cargas volumosas em grandes distâncias. De acordo com Cigana (2013), no caso particular do Rio Grande do Sul, esse modal transporta apenas 4% das cargas no Estado, enquanto no Brasil o percentual sobe para 13%, sendo que o Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP) planeja aumentar a participação das hidrovias na matriz de transporte para 25% nos próximos dez anos. “Além do custo menor, o transporte hidroviário é menos poluente e, se fosse incentivado, ajudaria a desafogar as rodovias (CIGANA, 2013).”

Sabe-se que a capacidade de transporte de chatas é bastante superior a capacidade de transporte de caminhões, além de ser menos poluente. Sendo assim, a utilização das hidrovias, além de ser mais econômica, auxilia na redução de emissão de gases que causam efeito estufa. Em termos econômicos, “[...] a opção hidroviária possibilita a redução de tarifas e fretes na circulação de pessoas e cargas, potencializando diversas atividades produtivas. De forma geral, a literatura técnica aponta que o frete hidroviário para fluxos de minérios e granéis agrícolas em longas distâncias é metade do frete ferroviário e cerca de 1/4 do frete rodoviário. (FINGER, 2012)”. Além disto, estimativas do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento indicam que, anualmente, o Brasil desembolsa cerca de R\$ 1 bilhão para subsidiar o frete para escoamento da safra agrícola, que é transportada pelo modal rodoviário até os portos das regiões sudeste e sul (SECRETARIA DOS TRANSPORTES, 2010). Na Figura 1 pode ser verificada a comparação da eficiência energética entre os modais.

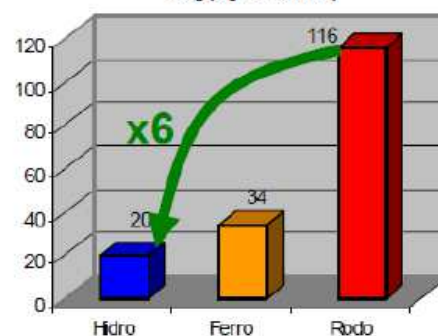


**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: CARGA / POTÊNCIA (t/ HP)**

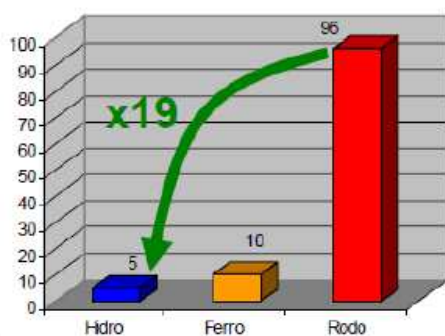


**EMIÇÃO DE POLUENTES:**

CO<sub>2</sub> (kg/1.000 tku)

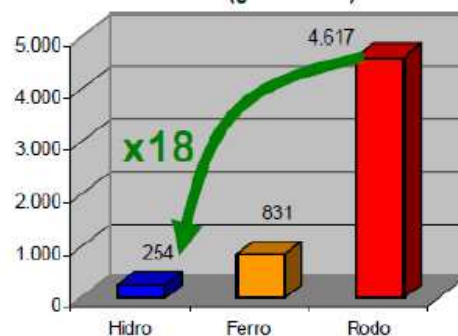


**CONSUMO DE COMBUSTÍVEL: (LITROS / 1.000 TKU)**



Fonte: Ministério dos Transportes - 1997

Nox (g/1.000 tku)



Fonte: DOT/ Maritime Administration e TCL

Figura 1 – Parâmetros de eficiência energética, consumo de combustível e emissões por modal.

(fonte: adaptado de Secretaria dos transportes, 2010).

O transporte hidroviário também contribui para a redução do fluxo de caminhões nas rodovias, o que diminui os acidentes de trânsito, reduz os custos hospitalares e possibilita menores gastos com a manutenção das rodovias. Segundo dados da Associação Brasileira de Acidentes de Trânsito (POR VIAS SEGURAS, 2013), o Ministério da Saúde registrou 43.250 óbitos no ano de 2011 e 179.000 feridos hospitalizados em 2012, já o Seguro DPVAT pagou 60.000 indenizações por morte e 352.000 por invalidez só no ano de 2012. Deste total, mais de 50% dos acidentes ocorreram nas regiões sul e sudeste que são os principais centros produtores e consumidores de bens e serviços do país.

Outro obstáculo para o desenvolvimento da navegação interior no Brasil é o recorrente conflito para garantia do uso múltiplo dos recursos hídricos, em especial decorrentes da construção de empreendimentos hidrelétricos sem as obras de transposição desses barramentos. Apesar de considerar a implantação de usinas hidrelétricas como essencial para o desenvolvimento sustentável do país, é fundamental que a expansão hidrelétrica

não inviabilize o desenvolvimento da navegação interior no Brasil (SECRETARIA DOS TRANSPORTES, 2010).

## **1.2 Setor hidroenergético no Brasil**

A água é o recurso natural mais abundante na Terra: recobre 2/3 da superfície do planeta sob a forma de oceanos, calotas polares, rios e lagos, e, também, uma das poucas fontes para produção de energia que não contribui para o aquecimento global, principal problema ambiental da atualidade. E, ainda, é renovável. Pelos efeitos da energia solar e da força da gravidade, o líquido transforma-se em vapor, que se condensa em nuvens, retornando à superfície terrestre sob a forma de chuva.

Usinas hidrelétricas surgiram no fim do século XIX. Em 1878, Cragside, a residência do inventor britânico Lord Armstrong em Northumberland, tornou-se a primeira casa alimentada por uma usina hidrelétrica. No entanto, a primeira usina hidrelétrica foi aberta somente no ano de 1882 no Rio Fox e produziu cerca de 12,5 KW de eletricidade (SEED, 2013).

Ser favorecido por recursos naturais que se transformam em fontes de produção de energia é estratégico para qualquer país, pois reduz a dependência do suprimento externo. No caso dos potenciais hídricos, a esses argumentos favoráveis, somam-se outros dois: o baixo custo do suprimento na comparação com outras fontes (carvão, petróleo, urânio e gás natural, por exemplo) e o fato de a operação das usinas hidrelétricas não provocar a emissão de gases causadores do efeito estufa (ANEEL, 2008). No Brasil em particular, entre 1974 e 2012 a potência instalada em usinas hidrelétricas passou de 13.724 MW para 84.736MW. (STEFANO, 2012).

Em 2006, de acordo com a ANEEL (2008), o Brasil ocupou o segundo lugar como país mais dependente da energia hidroelétrica no mundo e em terceiro lugar como maior produtor de energia proveniente da água. Sendo assim fica evidente a importância deste setor para a economia brasileira.

Portanto, de posse dessas informações, a construção de eclusas, para interligar os setores dos transportes com o setor energético, é um dos meios essenciais para atingir a meta de expansão na participação do modal hidroviário brasileiro, sem, por sua vez,

inviabilizar a construção e operação de usinas hidrelétricas que fomentam o desenvolvimento socioeconômico do país.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes que orientam a pesquisa estão apresentadas neste capítulo.

### **2.1 Objetivos**

Os modelos físicos de laboratório, com dimensões menores que as de protótipo permitem que se estude a maior parte dos fenômenos hidráulicos, desde que respeitadas as leis de semelhança e as condições para reduzir os efeitos de escala. Diante disto, o presente estudo pretende contribuir para a compreensão da distribuição longitudinal das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida.

### **2.2 Demais objetivos**

Os demais objetivos da pesquisa são:

- a) verificar se a metodologia sugerida por Battiston (2013) para estimativa das pressões a jusante da comporta podem ser aplicadas a outras aberturas e condições de escoamento;
- b) verificar quais as condições de abertura da comporta onde ocorrem as pressões mínimas junto à base e ao teto;
- c) verificar a que distância da comporta pode ocorrer pressões mínimas junto à base e ao teto;
- d) identificar a partir de quais condições se pode esperar a ocorrência de pressões negativas e quais as estimativas destas pressões para se inferir a possibilidade de danos por erosão e/ou cavitação.

### **2.3 Delineamento**

Os ensaios para obtenção dos dados foram realizados em modelo físico de laboratório de um aqueduto de uma eclusa genérica. Se, associada às Eclusas de Tucuruí, o modelo estaria na escala 1:16. Nesta bancada de ensaios foi possível medir as pressões originadas com a passagem do escoamento por um estrangulamento ocasionado por uma comporta tipo segmento invertida. A pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas, sendo:

- 1) pesquisa bibliográfica;
- 2) definição do programa experimental;
- 3) investigação experimental;
- 4) análise de dados;
- 5) conclusões.

A etapa de pesquisa bibliográfica proporcionou verificar qual o estado da arte e permitiu o embasamento teórico dos temas relacionados à pesquisa, tais como definição de eclusa e todos os componentes nela inseridos, além de informações acerca dos problemas que podem ocorrer durante o enchimento e esvaziamento da eclusa e sugestões de soluções para os mesmos.

A etapa de definição do programa experimental consistiu na elaboração do plano de ensaios no modelo físico de laboratório, bem como a determinação das vazões ensaiadas, aberturas de comporta e calibração dos transdutores de pressão.

A etapa de investigação experimental consistiu na realização dos ensaios.

Na fase de análise de dados utilizaram-se abordagens encontradas na literatura consultada a fim de verificar sua aplicabilidade e repetibilidade para outras condições de ensaios.

Nas conclusões são apresentados os resultados encontrados com a pesquisa e, ainda um capítulo com as principais recomendações acerca da utilização desses resultados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Eclusas

Ussami (1980) comenta que a superação de obstáculos na navegação interior é anterior à era cristã, tendo sido iniciada pelos romanos, egípcios e chineses, através das barragens móveis, antecessoras das eclusas. No entanto, de acordo com Tondowski (1987), as eclusas com câmara apareceram quase que simultaneamente em três países: Holanda, Alemanha e Itália, no Século XV. Entretanto, Leonardo da Vinci é que propõe pela primeira vez o uso de válvulas para o enchimento e esvaziamento de eclusas com câmaras e quem divulgou as eclusas em toda a Europa entre 1470 e 1520.

As eclusas de navegação são mecanismos semelhantes a elevadores. Elas têm a função de transpor embarcações através de desníveis, naturais ou de ação antrópica, como as barragens, permitindo assim a navegação. Ussami (1980) destaca que as eclusas são estruturas hidráulicas, cuja finalidade é transpor de nível as embarcações por meio de enchimento ou esvaziamento da câmara, onde são estacionadas as embarcações. Sabe-se que a câmara, juntamente com todo o sistema de eclusagem, funciona segundo o princípio de vasos comunicantes, e os processos de eclusagem podem ser efetuados por bombeamento ou por gravidade. Na Figura 2 pode ser vista uma foto panorâmica da eclusa de Tucuruí, uma das maiores do país, e na Figura 3 tem-se um esquema genérico de funcionamento das eclusas.

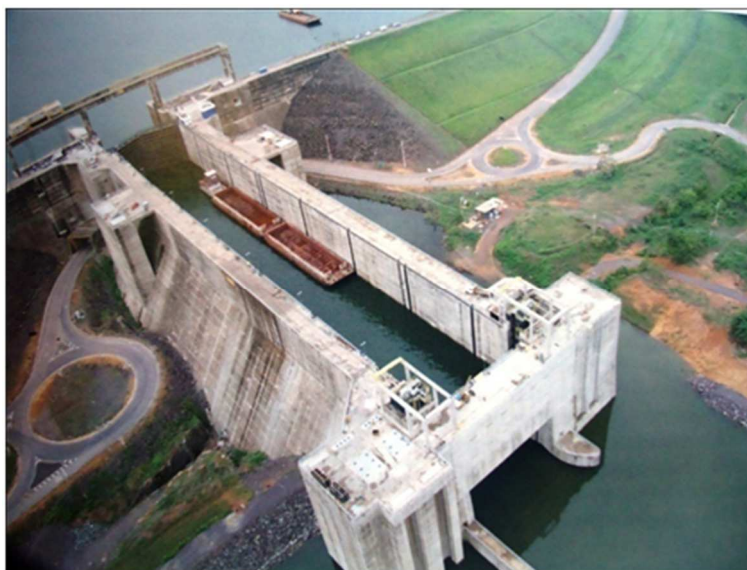


Figura 2 – Eclusa de Tucuruí.

(fonte: MOVIMENTO DE SOLIDARIEDADE ÍBERO-AMERICANA, 2010)

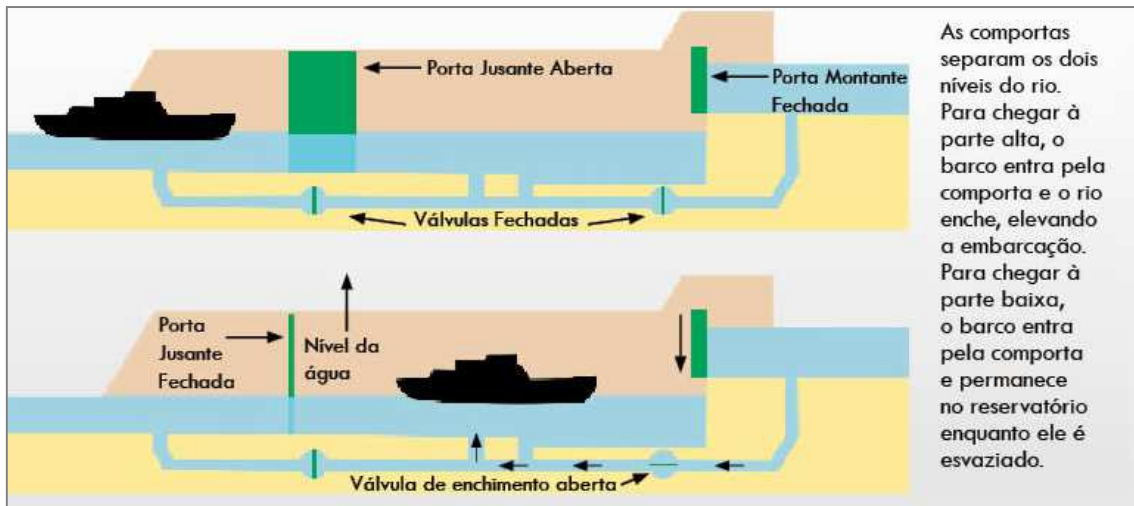


Figura 3 – Funcionamento esquemático de uma eclusa

(fonte: BRAZ, 2010)

Sabe-se que as eclusas são estruturas que desafiam a engenharia, pois são acompanhadas de fenômenos hidráulicos nocivos à estrutura ou à embarcação, e por isso devem ser estudados. Dentre as maiores dificuldades no projeto e na operação dessas obras hidráulicas estão: agitação da superfície da linha d'água no interior da câmara, quantificação dos esforços nas amarras, as altas quedas necessárias, que proporcionam altas velocidades no interior dos condutos e, conseqüentemente, a diminuição das pressões, favorecendo o fenômeno de erosão (desgaste) e/ou cavitação. Os esforços nas amarras estão ligados diretamente à agitação da linha d'água no interior da câmara, está, também, ligada à velocidade de enchimento ou esvaziamento da câmara e, por conseguinte à velocidade de abertura da comporta. A vazão aduzida (afluente) para a câmara não é constante ao longo do tempo, sendo função do desnível entre a câmara e o grau de abertura da comporta. Por conta disso, podem se formar oscilações harmônicas (uninodais ou multinodais) no interior da câmara. Independentemente da natureza, as oscilações podem atingir grandes amplitudes e a consequência disso são esforços excessivos nas amarras e na estrutura dos barcos. Quando essas tensões ultrapassam os limites de tensão admitidos, ocorre o rompimento dos cabos. Como consequência, os barcos ficam livres, podendo se chocar com as paredes da eclusa e com os demais barcos que podem estar sendo transportados, danificando o sistema elevatório e os próprios barcos. Portanto, o enchimento ou esvaziamento deve ser conduzindo o mais tranquilamente possível buscando atingir o ponto ótimo entre o tempo de eclusagem e os esforços máximos admissíveis nas

amaras. Isto muitas vezes obriga a manter a abertura da comporta em posições fixas ou a aberturas muito lentas.

Já a cavitação, tema abordado no item subsequente, pode ocasionar a destruição das paredes dos aquedutos, erosão, além de vibrações e ruídos em decorrência das flutuações de pressões. Em eclusas, os locais mais propícios à cavitação são as curvas muito fechadas nos condutos e a região a jusante da comporta do sistema de enchimento e esvaziamento da câmara. No primeiro caso, a força centrífuga direciona o escoamento para o lado exterior do conduto, gerando uma zona de depressão na parte mais interna, essa depressão possibilita a formação das bolhas. No segundo, as altas velocidades, oferecem condição para os valores de pressão atingirem valores iguais ou menores que a pressão de vapor da água, dessa forma esta representa a região mais suscetível no que diz respeito às pressões mínimas. Aliada à cavitação existe outro fenômeno que é consequência dos grandes esforços causados pelo escoamento, a erosão. A erosão pode se dar pelo desgaste da estrutura frente às condições do escoamento de velocidades e pressões negativas que podem arrancar os grãos de areia do concreto quando as pressões são da ordem de  $-6mca$  (PORTUGAL, 1981).

United States of America (1995) classifica as eclusas em baixa queda, nas quais os desníveis atingem até 10 m, eclusas de média queda, entre 10 e 15 m, e as eclusas de alta queda, desníveis acima de 15 m. De acordo com Santos (1998), as eclusas de baixa queda são utilizadas para melhoria de navegação, já as de alta queda são utilizadas, geralmente, onde prevalecem os interesses hidrelétricos. No Brasil é comum a utilização de eclusas projetadas em usinas nas quais prevaleceu o interesse hidrelétrico. O mesmo autor ainda salienta que a queda hidráulica de uma eclusa é a diferença entre os níveis de água de montante e jusante. São essas quedas que definem o tipo, a classificação e o custo de projeto, execução, operação e manutenção. Na sequência são apresentados os tipos de eclusas segundo Silva (2012).

### *3.1.1 Tipos de eclusas*

Silva (2012) classifica as eclusas em 4 tipos: eclusas simples ou singela, escada de eclusas, eclusa de câmara múltipla e eclusas geminadas.



Nas eclusas simples ou singelas há basicamente uma câmara onde o nível de água pode variar pela conexão sucessiva com os níveis de água de montante e jusante. Há também duas portas (montante e jusante) para entrada e saída das embarcações.

As eclusas tipo escadas são utilizadas quando o desnível a ser vencido supera o máximo desnível economicamente vencível por uma eclusa simples. Desta forma pode-se fracionar o desnível em vários “degraus” com uma eclusa em cada um. São eclusas independentes, e entre duas eclusas simples tem-se um canal intermediário, onde há um cruzamento de embarcações (maior tráfego). O custo é maior.

No caso de eclusas de câmaras múltiplas, as câmaras são justapostas, de forma que a porta de montante da câmara inferior coincide com a de jusante da câmara superior. Há uma restrição ao tráfego e percebe-se a economia de água.

No caso da capacidade de tráfego de uma eclusa singela, ou uma eclusa de câmara múltipla não ser suficiente para atender o tráfego, pode-se dispor de eclusas construídas em paralelo, eclusas geminadas, com as mesmas dimensões ou dimensões diferentes.

### *3.1.2 Componentes de uma eclusa*

A câmara da eclusa é, geralmente, de forma retangular, constituída de dois muros paralelos, fechada nas extremidades por portas onde entram e saem as embarcações. As extremidades da câmara são denominadas cabeças da eclusa. Existem, portanto, duas cabeças: uma, a montante, e outra, a jusante da câmara da eclusa. As portas são de grandes proporções, devendo ser suficientes para permitir a passagem das embarcações. A partir das cabeças das eclusas são construídos muros relativamente longos, que se estendem nas direções dos canais de aproximação, tanto a montante como a jusante, com a finalidade de direcionar as embarcações em trânsito. Esses muros são denominados de muros-guia (USSAMI, 1980).

O sistema de distribuição é um conjunto de elementos hidráulicos que permite o fluxo de água para enchimento e esvaziamento da câmara. Santos (1998) destaca que este sistema é fundamental para a tranquilidade do plano d'água, desta forma seu objetivo é distribuir pequenas e iguais vazões por todo fundo da câmara de forma simultânea. Ussami (1980) ainda aborda que esses sistemas são constituídos de aquedutos primários e secundários, derivações, orifícios, comportas, difusores, tomada d'água, dispositivos

especiais, etc., cuja finalidade é alimentar e esgotar convenientemente a câmara, sem causar danos às embarcações, evitando colocar em risco os seus tripulantes, ao mesmo tempo sem causar excessiva demora na transposição do desnível.

As válvulas e a própria região das válvulas, especialmente a jusante, devem ser objeto da mais cuidadosa verificação e projeto, uma vez que na região ocorrem as maiores velocidades de todo o circuito, que aliadas à menor pressão imposta por jusante, podem criar as condições para o aparecimento da cavitação (SANTOS, 1998). O fenômeno de cavitação e a sua ocorrência em válvulas serão abordados no subitem 3.2 do capítulo 3.

### 3.1.3 Eclusas de alta queda

No Brasil, existe uma tendência nas barragens de fazer eclusas de alta queda, isto é, com mais de 15 m, devido aos aproveitamentos hidrelétricos. Muitas vezes constrói-se mais de uma eclusa, como é o caso de Tucuruí. O Quadro 1 apresenta as principais eclusas de alta queda no Brasil.

Eclusa	Queda (m)	Volume da câmara (m <sup>3</sup> )
Barra Bonita (Tiête)	27	47.600
Porto Primavera (Paraná)	22	78.500
Tucuruí (Tocantins)	35	240.000
Sobradinho (São Francisco)	33	86.500
Três Figueiras (Ivaí)	15	37.000

Quadro 1 – Eclusas de alta queda brasileiras

(fonte: adaptada de SANTOS, 1998)

As eclusas de alta queda estão associadas a intenções múltiplas, em geral, à geração de energia elétrica, nas quais quanto maior a queda, maior o potencial. Os altos desníveis, acima de 15 m vêm sendo bastante utilizados no Brasil devido à grande utilização de barramentos, que formam os reservatórios das hidrelétricas. Porém, Santos (1998) acautela que o uso desses sistemas de alta queda possui diversas limitações:

- a) volume das eclusagens, que em hidrovias de rios com vazões pequenas pode ser importante [...];
- b) o pico das vazões de enchimento/esvaziamento, que é alto, implicando cuidados especiais em todo projeto [...];

- c) problemas de erosão e/ou cavitação a jusante das válvulas, comuns na alta queda e extremamente preocupantes, à medida que podem danificar o conduto a jusante das válvulas, provocando interrupções para manutenção;
- d) problemas com a tranquilidade do plano da água interno à câmara e consequente minimização de esforços nas embarcações;
- e) a alta queda implica alta energia cinética no nível de distribuição interna, no início do enchimento, o que leva a problemas de turbulência local; a alta queda também maximiza desequilíbrios na distribuição de velocidades nos condutos, o que se traduz por diversidade de vazões aduzidas em partes diversas da câmara, implicando em formação de ondas estacionárias com graves consequências nos esforços em cabos de amarras das embarcações.

Dentre as limitações citadas, a de maior importância para a pesquisa que discorre é a ocorrência de erosão e/ou cavitação. Como medida para diminuir os efeitos deste fenômeno, que será discutido posteriormente, encontra-se o uso de comportas tipo segmento invertida.

#### 3.1.4 Comportas segmento em eclusas

Uma comporta pode ser entendida como um equipamento que permite o controle da vazão de água em reservatórios, condutos e represas. Sua aplicação atinge diversos campos da Engenharia Hidráulica, tais como: proteção e manutenção de equipamentos, controle de nível, regularização de vazões em barragens, instalação em tomadas d'água para usinas hidrelétricas, dentre outros.

Santos (1998) afirma que vários tipos de válvulas foram utilizadas em eclusas, sendo que até 1950, nas eclusas de alta queda, predominava a aplicação de comportas planas. A partir de 1930, devido ao grande sucesso técnico e econômico que estava sendo obtido com a aplicação de comportas segmento (*Tainter gates*) em descarregadores de superfície, Figura 4, essas comportas passaram a ser aplicadas nos sistemas de enchimento/esvaziamento das eclusas.

A comporta segmento é formada, geralmente, por uma chapa metálica curva, segmento de um cilindro. Quando utilizada em descarregadores de superfície, os braços radiais da comporta funcionam à compressão. Quando utilizada invertida, caso das eclusas, Figura 5, os braços funcionam à tração. Além disto, o escoamento na parte de montante, na qual estão os braços, é mais tranquilo, e os braços não atrapalham o escoamento.

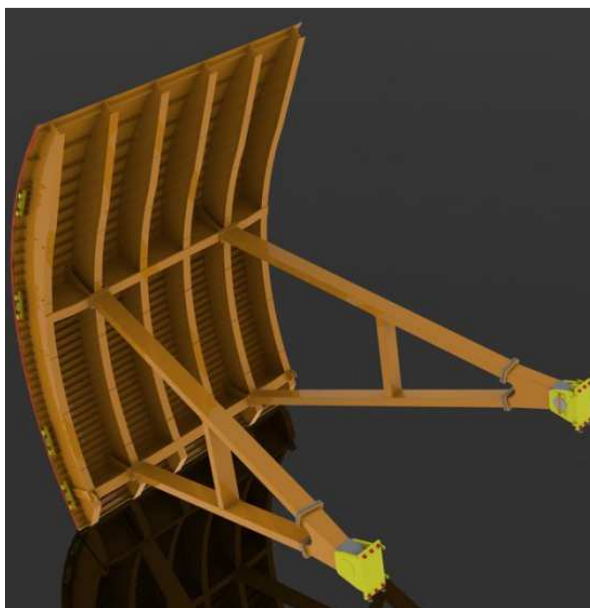


Figura 4– Comporta segmento, quando utilizadas em descarregadores os braços radiais funcionam à compressão.

(fonte: DEMUTH ENERGY, 2013)



Figura 5–Comporta tipo segmento, utilizada na posição invertida, os braços radiais funcionam sob regime de tração.

(fonte: adaptada de UNITED STATES OF AMERICA, 1975)

Santos (1998) explana que o uso da comporta segmento favorece a entrada de ar nos aquedutos pelo poço da comporta, na fase acelerada do escoamento, a jusante da comporta. Essa entrada de ar pode limitar a vazão líquida. A entrada de ar causa, então, grande turbulência e perturbações no plano de água interno à câmara, quando o ar for expulso, causando riscos à segurança das embarcações. A comporta segmento passou, então, a ser implantada na posição invertida, com braços solicitados à tração. Quando a

comporta é utilizada desta forma, a região de baixa pressão não fica abaixo do poço da comporta, dessa forma o ar da superfície não é levado para o escoamento. Atualmente, não se concebe outra solução que possa ter melhor desempenho técnico-econômico para as eclusas de alta queda do que a comporta segmento invertida.

### 3.2 Cavitação

A palavra cavitação deriva do latim *cavus* – cavidade – e significa a formação de bolhas de vapor em um fluido e é um fenômeno originado em função das pressões instantâneas das flutuações e não somente provocado pelas pressões médias. Dourado (1986) define que a perda de carga também interfere nas pressões a jusante das comportas. Por exemplo, em um aqueduto expandido com aumento gradual ocorrerá diminuição nos valores de velocidades médias, menores perdas de carga e, como consequência, aumento nos valores das pressões. O desenvolvimento dessas pressões tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores espalhados pelo mundo, como Ussami (1980), Tondowski (1987), Santos (1998), Shinqin et al (1999), Shengyi et al. (2005) entre outros, porém, devido à sua complexidade, somente agora, com o advento da tecnologia que elaborou equipamentos que pudessem medir as pressões instantaneamente<sup>1</sup>, o comportamento das mesmas está sendo melhor definido.

De acordo com Virgil (1963), a definição de cavitação está relacionada com a formação de bolhas no líquido de forma muito rápida. No entanto, o autor relata que o termo cavitação é geralmente usado para se referir à formação de cavidades ocasionadas por forças hidrodinâmicas, onde se podem incluir os problemas devido à erosões e desgastes. Terres (2006) explica que a formação das bolhas pode ser originada por aquecimento do fluido, mantendo-se sua pressão constante, ou por diminuição de sua pressão, mantendo-se a temperatura constante. No primeiro caso, ocorre apenas a transição da fase líquida para a fase vapor, mas quando a mudança de fase ocorre pela queda da pressão, então o fenômeno é denominado de cavitação.

A cavitação, em termos hidráulicos, é um fenômeno que ocorre quando um líquido é submetido a baixas pressões, próximas à pressão de vapor. Quando isso ocorre, o ar dissolvido no líquido se gaseifica formando bolhas. Essas bolhas, ao serem levadas pelo escoamento a regiões nas quais a pressão volta a se elevar, implodem. Dourado (1986) define a cavitação como um fenômeno dinâmico que consiste na formação e no colapso subsequente de cavidades ou bolhas cheias de vapor, num líquido em escoamento sob pressão.

A cavitação pode ser diferenciada em dois tipos, gasosa e vaporosa. Tullis (1982) explica que a cavitação gasosa ocorre quando, ou existe uma considerável quantidade de

---

<sup>1</sup> Alta frequência de aquisição.

ar em suspensão na água, ou quando o processo de cavitação é suficientemente lento, permitindo o aumento da quantidade de ar no interior da cavidade de vapor em decorrência da desgaseificação do líquido. A taxa de crescimento e colapso da bolha é muito mais lenta para a cavitação gasosa devido à presença de ar livre. Consequentemente, o processo não é tão violento e normalmente não deverá criar uma situação de algum interesse. Terres (2006) explica que a presença da fase gasosa no escoamento implica em uma maior resistência ao escoamento, causando uma diminuição da vazão, considerável perda de carga e pulsações de pressão indesejáveis no escoamento. Já a cavitação vaporosa deve ser avaliada com maior cuidado, Tullis (1982) relata que se existir pouquíssimo ar no líquido, de forma que a cavidade consiste quase exclusivamente de vapor, as taxas de crescimento e de colapso e as pressões geradas devido ao colapso da cavidade serão extremamente elevadas e poderão causar danos severos. Este caso é denominado cavitação vaporosa e se constitui no tipo de cavitação que deverá ser de interesse prático ao engenheiro.

O escoamento dentro dos condutos de adução da eclusa ocorre de forma pressurizada. Sendo assim, a presença de ar em suspensão no escoamento é bastante baixa, classificando a cavitação no interior destes em cavitação vaporosa.

Coelho (2006) e Terres (2006) expõem que o fenômeno de cavitação está associado a diversos processos nos quais a mecânica de fluidos está inserida. Por exemplo, onde ocorrer separação no escoamento, a turbulência se torna muito importante, determinando o início da cavitação. Por isso, a cavitação pode ocorrer em quaisquer dispositivos, tais como, bombas e turbinas hidráulicas, dissipadores de energia, condutos pressurizados, nos processos de pasteurização do leite e para limpeza de superfícies sólidas.

Contudo, para a ocorrência de cavitação devem existir três requisitos fundamentais, são eles: existência de núcleos no sistema que serve de base para a vaporização do líquido, pressão em algum ponto do líquido deverá cair para ou próximo à pressão de vapor, e em terceiro lugar, a pressão do ambiente em volta da cavidade do vapor deverá ser superior à pressão de vapor de forma a provocar sua implosão (TULLIS, 1982).

Muitas vezes o processo de cavitação é posterior ao processo de erosão da superfície. A erosão se dá pelo arrancamento das partículas do concreto quando a pressão atinge cerca

de -  $6mca^2$ , valor de resistência à tração do concreto. Essa erosão cria irregularidades na superfície sólida que favorecem a ocorrência do fenômeno de cavitação. Pinto *apud* Ball<sup>3</sup> (1976) cita que as irregularidades máximas permitidas, em superfícies de concreto, são chanfros limitados a 20:1, 50:1, 100:1 os quais admitem velocidades de fluxo de 12 a 28 m/s, 28 a 37 m/s e superior a 37 m/s, respectivamente.

### 3.2.1 Cavitação em eclusas de navegação

No caso de eclusas de alta e média queda, é possível a ocorrência de erosão ou cavitação das estruturas localizadas a jusante das válvulas, de enchimento e de esvaziamento, em função dos fluxos de alta velocidade, principalmente, nos pontos de curvas, recesso de *stops-logs* e na região imediatamente a jusante das válvulas (TONDOWSKI, 1987).

Gontijo e Campos (2005) salientam que nas eclusas de navegação os problemas decorrentes da cavitação são mais graves a jusante das comportas controladoras de vazão. Portanto, tanto na hidráulica de enchimento como na de esvaziamento, a região da comporta é um ponto de máxima importância do projeto, pois é através da estrutura elevatória, funcionando corretamente, que se conseguirá realizar o transporte, em condições adequadas, das embarcações. Os autores ainda enfatizam que a região adjacente às válvulas deve ser objeto da mais cuidadosa avaliação no projeto, pois é nesta região que ocorrem as maiores velocidades de todo o circuito, que aliadas a baixas pressões, podem levar ao fenômeno da cavitação. Dourado (1986) estabelece a mesma preocupação com a região à jusante das comportas, afirmando que os problemas decorrentes da cavitação são observados a jusante das comportas dos condutos de adução e esgotamento, em maior escala e menos importantes nas curvas, derivações e orifícios.

A cavitação pode ser classificada em três estágios: cavitação incipiente, crítica e de bloqueio (TULLIS, 1982):

- a) Cavitação incipiente: termo frequentemente usado quando se faz referência ao estágio inicial da cavitação. Já que a cavitação se constitui

---

<sup>2</sup> Valor limite típico de resistência à tração do concreto (PORTUGAL, 1981)

<sup>3</sup> Ball, J. W. Cavitation from surface irregularities in high velocity flow. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, p 1283-1297. September, 1976.



em um processo fortuito, não existe realmente um ponto definitivo de inepção que separa a faixa não cavitante da cavitante. A intensidade da cavitação nestas condições consiste de estouros leves e intermitentes. Deve-se prestar atenção para distingui-los do ruído do escoamento de fundo;

- b) cavitação crítica: apresenta ruído estacionário, porém leve. A cavitação, em ponto crítico, não será desagradável e não irá reduzir a vida da válvula;
- c) cavitação de bloqueio: na medida em que o escoamento, através de uma válvula, aumenta a pressão média logo à jusante da válvula eventualmente cai para a pressão de vapor, e a válvula bloqueia. O termo significa que para uma dada pressão a montante, a descarga máxima passa pela válvula. Próximo ao bloqueio, a intensidade da cavitação na válvula (usando-se a intensidade do ruído e da vibração como medida) alcança a sua intensidade de pico. O escoamento próximo ao bloqueio é instável.

Para que a classificação dos estágios da cavitação seja feita de forma mais precisa, pode ser utilizado o potencial de cavitação, tema abordado na sequência do capítulo.

### *3.2.2 Potencial de Cavitação*

Santos (1998) assegura que inúmeros são os fatores intervenientes no fenômeno da cavitação e no seu desenvolvimento. São exemplos: condições geométricas, amplitude de flutuações de pressões, quantidade de partículas ou gás dissolvido, gradientes bruscos espaciais de pressão, pressão média local, velocidades médias e locais, acelerações locais. O mesmo afirma, também, que para análise qualitativa é necessário estabelecer um parâmetro adimensional.

O procedimento usado para análise quantitativa da cavitação 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 agir contra o fenômeno com simplicidade, convergindo para soluções adequadas, antes de maiores e custosas investigações em modelos (SANTOS, 1998).

Santos (1998) indica, portanto, um adimensional  $K$ , típico determinado pela equação 1.

$$K = \frac{P - P_{VG}}{P_U - P} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$P$  é a pressão a jusante da comporta;

$P_{VG}$  é a pressão relativa de vapor do fluido;

$P_U$  é a pressão a montante da comporta.

O mesmo adimensional, em função da velocidade do escoamento, denominado de índice de cavitação ( $\sigma$ ), pode ser descrito pela equação 2 (DOURADO, 1986; SANTOS, 1998):

$$\sigma = \frac{P - (P_{atm} + P_{VG})}{\rho \cdot \frac{V^2}{2}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$P$  é a pressão medida no ponto;

$P_{atm}$  é a pressão atmosférica;

$P_{VG}$  é a pressão de vapor do líquido;

$\rho$  é a massa específica do líquido;

$V$  é a velocidade em termos médios do escoamento;

Sendo assim, o índice de cavitação é utilizado para indicar em primeira análise a existência ou não do risco da cavitação junto às comportas (DOURADO, 1986). Contudo, deve-se tomar cuidado ao usar este índice, pois o valor do índice de cavitação, para o qual a estrutura irá apresentar danos de erosão ou cavitação, deve ser o mesmo para estruturas semelhantes e com condições de escoamento similares.

O índice de cavitação pode ser considerado o parâmetro básico de semelhança em escoamentos nos quais o fenômeno ocorra, mas, de acordo com Gikas (1982), não representa condição suficiente de semelhança dinâmica, visto que se baseia em duas hipóteses simplistas:

- a) ocorre cavitação quando a pressão em algum ponto do escoamento atinge a pressão de vapor do líquido;
- b) a pressão tem uma relação de semelhança com o quadrado da velocidade, ou seja, inversamente proporcionais.

Vale destacar que o fenômeno de cavitação não pode ser representado em escala, mas podem ser utilizados modelos reduzidos para inferir a possibilidade de ocorrer ou não no protótipo, danos por erosão e/ou cavitação.

### *3.2.3 Medidas atenuantes quando da ocorrência de cavitação*

Existem diversos estudos que visam obter medidas que evitam ou pelo menos diminuem os efeitos danosos da cavitação. Dentre as medidas podem ser citadas o encamisamento (blindagem) com material mais resistente à erosão ou cavitação, a aeração (introdução de ar no escoamento), a mudança na geometria do conduto e as leis de manobra especiais para a abertura da comporta.

O encamisamento é o envolvimento das paredes que sofrem com os processos erosivos da cavitação com um material resistente. É importante o encamisamento das partes da válvula e da tubulação nos trechos submetidos aos efeitos da cavitação, com aço inoxidável ou com outro material resistente. Esta solução tolera a cavitação e evita a erosão da superfície (TULLIS, 1982). De acordo com Battiston (2013), a colocação de revestimentos resistentes é onerosa e não elimina o problema, somente retarda os efeitos da erosão por cavitação.

O controle da cavitação por aeração é a introdução controlada de ar no interior do conduto. O ar é incorporado ao escoamento por uma abertura a jusante da comporta. O princípio de funcionamento, segundo Dourado (1986), é o amortecimento do colapso das bolhas pelo ar. O ar também elimina as pressões baixas, choques e ruídos. No entanto, de acordo com Tullis (1982), o uso dessa medida deve ser analisado cuidadosamente, já que o ar injetado em tubulações pode causar transientes hidráulicos. Outro ponto negativo, apontado por Santos (1998), diz respeito à saída deste ar. Ao sair, o ar introduzido provocará bolhas no interior da câmara, ocasionando perturbações na linha da água que poderão exercer esforços demasiados nas amarras e nas estruturas das embarcações.

Santos (1998) sugere aberturas diferenciadas visando a menor permanência da comporta na situação mais crítica. As leis de manobra especiais ficam limitadas à capacidade dos equipamentos de acionamento e a determinadas situações que causariam esforços hidrodinâmicos excessivos. Contudo, Palauro (2012) conclui que aberturas sem interrupções tendem a apresentar pressões maiores que leis que apresentam paradas, o mesmo afirma ainda que no caso de haver interrupções as menores pressões ocorrem após a interrupção.

As últimas pesquisas da área têm investigado novas geometrias para os aquedutos da região das comportas. Shengyi *et al.* (2005), por meio de modelagens numéricas, testaram a combinação de expansões do conduto no teto e na base do aqueduto, Figura 6, e ultimaram que essa forma apresentou um escoamento mais estável devido ao maior espaço existente a jusante das comportas, ajudando a reduzir a velocidade e a reparar as pressões nessa região. Santos (1998) aponta que essas expansões no teto da galeria, que se localizam até 5 vezes a altura da válvula para jusante, implicam num potencial de cavitação menor. Shiqin *et al.* (1999) concluíram em seus estudos que a expansão do teto do conduto a jusante da comporta é uma boa alternativa para a prevenção da erosão por cavitação.

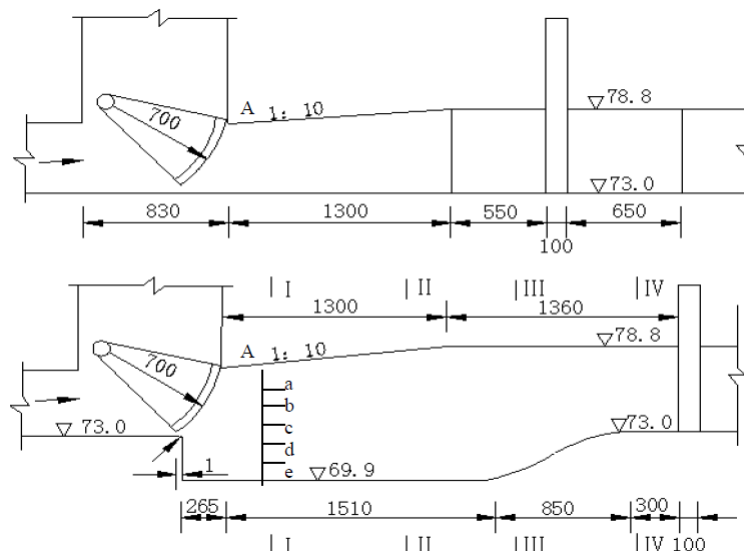


Figura 6 – Novas geometrias simuladas por Shengyi et al. (2005).

(fonte: adaptada de Shengyi et al. (2005)).

### 3.2.4 Coeficiente de contração

Para avaliar, de forma mais real possível, a velocidade média máxima que pode ocorrer a jusante, é, ainda, utilizado o coeficiente de contração, o qual fornece o valor da velocidade e pressão na veia contraída. Assim “o coeficiente de contração pode ser definido como sendo a razão entre a menor área ocupada pelo jato de água a jusante da comporta e a área de abertura da mesma (DOURADO, 1986)”. A veia contraída, também chamada de *vena contracta*, Figura 7, é a região a jusante da comporta, onde o escoamento sofre a maior contração.

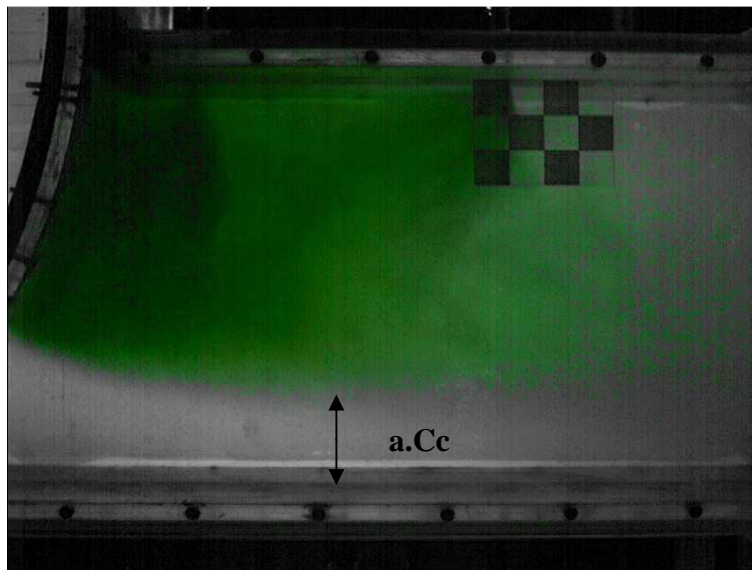


Figura 7 – Vena contracta: região de maior velocidade e menores pressões.

O coeficiente de contração pode ser expresso pela Equação 3 e geralmente é calculado através da equação de Bernoulli e da continuidade, considerando a distribuição de pressões a montante e a jusante da comporta.

$$C_c = \frac{A}{l \cdot a} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$C_c$  é o coeficiente de contração;

$A$  é a menor área (efetiva) do escoamento a jusante da comporta (veia contraída) onde a velocidade é  $V_V$ ;

$a$  é a abertura da comporta;

l é a largura do aqueduto.

Na Figura 8 são apresentados, os valores do coeficiente de contração encontrados por diferentes autores em função da porcentagem de abertura da comporta.

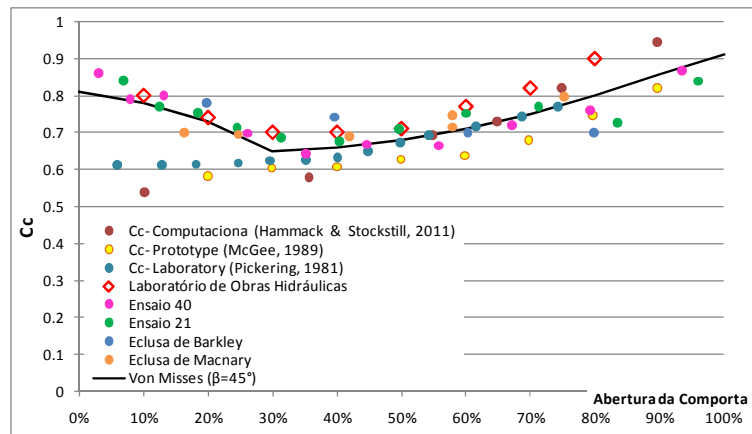


Figura 8 – Coeficientes de contração na comporta segmento invertida para diferentes autores<sup>4</sup>.

Dourado (1986) enfatiza também que o coeficiente de contração depende do grau de abertura da comporta e de suas características geométricas. As investigações realizadas em comportas do tipo segmento invertidas utilizadas na grande maioria das eclusas mostram que o coeficiente de contração varia na faixa de 0,60 e 0,90 em função da porcentagem de abertura das comportas, como pode ser observado pela Figura 8.

<sup>4</sup>Os ensaios denominados Ensaio 21 e Ensaio 40 são citados por Ussami (1980) e, no texto, não fica claro qual autor produziu o dado, da mesma forma para Eclusa de Barkley e Eclusa de Macnary.

### 3.3 Previsão da distribuição longitudinal das pressões a jusante de comporta segmento invertida

#### 3.3.1 Verificação experimental

A maior parte dos estudos sobre pressões a jusante de comportas é feito para casos específicos de protótipos podendo-se citar a eclusa de Porto Primavera, e o sistema de eclusas de Tucuruí, entre outros, que estudaram as pressões em modelo físico que podem ocorrer para os casos de enchimento e esvaziamento em diferentes tempos de eclusagem.

Recentemente Kempka (2011), Palauro (2012) e Battiston (2013) efetuaram estudos em um sistema genérico de enchimento e esvaziamento de câmara de eclusa com comporta invertida. Kempka (2011) e Battiston (2013) utilizaram o mesmo modelo de laboratório, contudo com medições e condições diferentes, já Palauro (2012) utilizou um modelo similar, mas na escala 1 : 0,64 com base no modelo utilizado pelas autoras citadas.

Kempka (2011) apresentou um conjunto de equações para estimar os coeficientes de pressão mínima a jusante da comporta para o teto e a base para diferentes condições de escoamento em regime permanente, Quadro 2.

$Cpk_{med} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0104 \cdot A_M - 0,3862$ ; coeficiente para pressão média na base;

$Cpk_{1\%} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0105 \cdot A_M - 0,5126$ ; coeficiente para pressão 1% na base;

$Cpk_{0,1\%} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0104 \cdot A_M - 0,3862$ ; coeficiente para pressão 0,1% na base;

$Cpk_{med} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0045 \cdot A_M - 0,3785$ ; coeficiente para pressão média no teto;

$Cpk_{1\%} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0046 \cdot A_M - 0,4359$ ; coeficiente para pressão 1% no teto;

$Cpk_{0,1\%} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0045 \cdot A_M - 0,4724$ ; coeficiente para pressão 0,1% no teto.

Quadro 2 – Conjunto de equações propostas por Kempka (2011).

(fonte: adaptada de Kempka, 2011)

Onde o parâmetro  $A_M$  é apresentado por meio da equação 4e o  $Cpk$  por meio da equação 5.

$$A_M = \frac{c}{V_V} \cdot z \sqrt{\frac{a}{D}}$$

Equação 4

$$C_{pk} = \frac{P}{\frac{V_v^2}{2 \cdot g}}$$

Equação 5

Onde:

P é a pressão no ponto considerado (mca);

$V_v$  é a velocidade na vena contracta da comporta em (m/s);

g é a aceleração devida à gravidade em (m/s<sup>2</sup>);

a é a abertura da comporta (m);

D é a altura do conduto (m);

c é a celeridade, expressa pela equação 6 recomendada pela Eletrobrás (BRASIL, 2003) onde:

$\rho$  é a massa específica da água (1000 kg/m<sup>3</sup>);

$K_2$  é o módulo de elasticidade da água (21,39 x 10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>);

E é o módulo de elasticidade do material do conduto, neste caso, o material do conduto foi acrílico (3,5 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>);

e é a espessura do conduto.

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \left( \frac{1}{K_2} + \frac{D}{E \cdot e} \right)}}$$

Equação 6

Palauro (2012) comparou as pressões em regime permanente (comporta parada) e em regime transitório (comporta em movimento) de escoamento, e concluiu que:

- a) a situação em regime permanente é mais crítica que a em regime transitório, e que, portanto, os resultados em regime permanente estão a favor da segurança, pois as eclusas operam em regime transitório;
- b) em regime transitório as aberturas que permitem o surgimento de pressões negativas variam entre 30% e 70%, contudo as menores pressões aparecem para aberturas entre 40% e 60%, tanto para a base como para o teto, Figura 9.



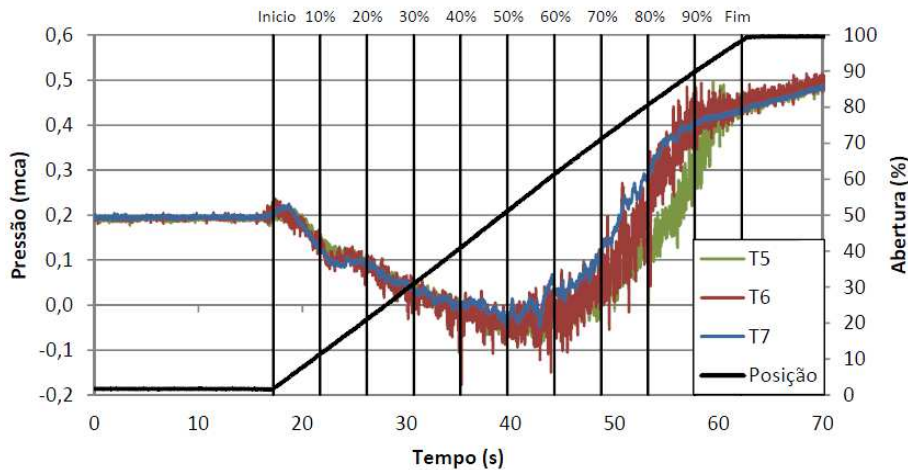


Figura 9 – Pressões medidas em 3 diferentes posições a jusante da comporta para o teto do conduto com velocidade de abertura da comporta de 3,6mm/s, em modelo.

(fonte: Palauro, 2012)

Battiston (2013), por meio de ensaios em modelo físico, identificou que escoamentos com número de Reynolds superior a  $3 \times 10^5$  tem o comportamento das pressões médias ao longo da base e do teto descrito por um coeficiente adimensional de posição ( $L_{adm}$ ), equação 7, e por um coeficiente adimensional de pressão média ( $C\bar{P}$ ), equação 8. No Quadro 3 podem ser conferidas as condições de ensaio da pesquisadora.

$$L_{adm} = \frac{L_i}{D - a} \quad \text{Equação 7}$$

$$C\bar{P} = \frac{\bar{P} - \overline{P_{a100\%}}}{\frac{v_a^2 - v^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

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

$\overline{P_{a100\%}}$  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;

$v$  é a velocidade média no conduto e;

$L_i$  posição dos pontos de medição;

$g$  é a aceleração gravitacional.

Vazão (l/s)	10%	30%	50%	60%	70%	80%	100%
22							
28							
32							
40							
60							
90							
130							
180							
220							

Quadro 3 – Vazões e aberturas simuladas em modelo físico por Battiston, (2013).

A autora enfatiza que a subtração da pressão de ocorrência na abertura de 100% das pressões de ocorrência em aberturas menores, elimina os efeitos de perda de carga linear e também os efeitos do nível à jusante, além de atenuar a variação da submergência do conduto a jusante, fazendo isso a autora procura analisar a influência da abertura da comporta nas pressões médias a jusante da comporta. Na Figura 10 pode ser apurado o comportamento dos adimensionais obtidos por Battiston (2013) na base da galeria e na Figura 11 os resultados encontrados para o teto em função da abertura da comporta.

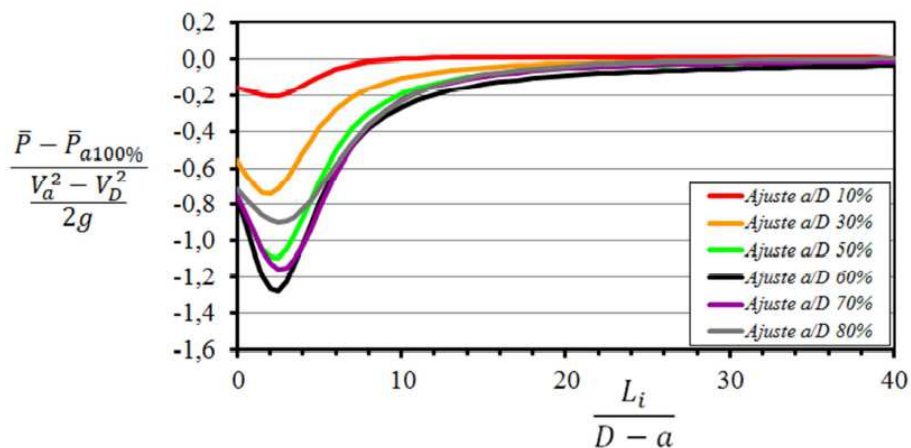


Figura 10 – Curvas finais dos coeficientes adimensionais para a base do conduto.

(fonte: Battiston, 2013)

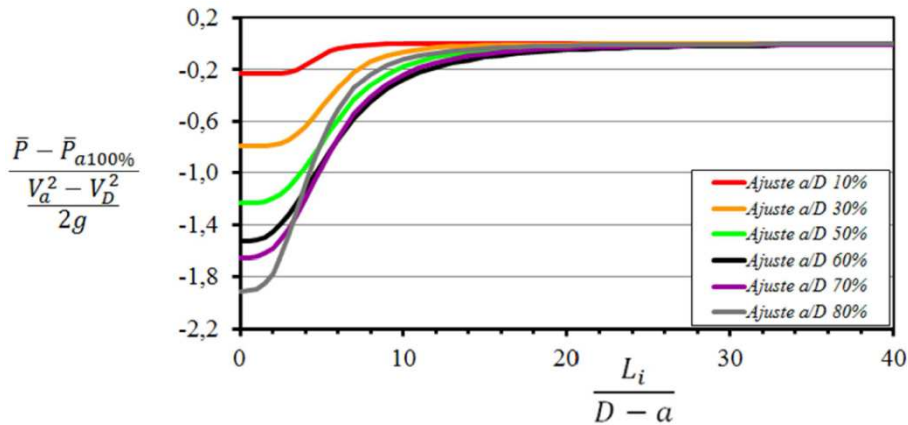


Figura 11 – Curvas finais dos coeficientes adimensionais para o teto do conduto.

(fonte: Battiston, 2013)

### 3.3.2 Simulação Numérica

Recentemente, vêm sendo feitos estudos de simulação numérica associada à modelagem física para calibração e verificação das simulações, podendo citar, entre outros, Santos (2012), Dalla Corte (2012) e Battiston (2013).

Santos (2012) simulou por meio do software comercial Ansys CFX, expansões no teto do conduto, Figura 12, e concluiu que “à medida que o comprimento da expansão no teto ( $L_{exp}$ ) aumenta as pressões mínimas também ficam maiores, assim como a pressão a montante da comporta. Além disso, pode-se observar que o aumento de  $L_{exp}$  faz com que a recuperação da pressão mínima ocorra numa localização mais distante da válvula, implicando em uma maior região com pressões mínimas, que podem ser negativas, conforme as condições de abertura da comporta e a vazão [...]”.

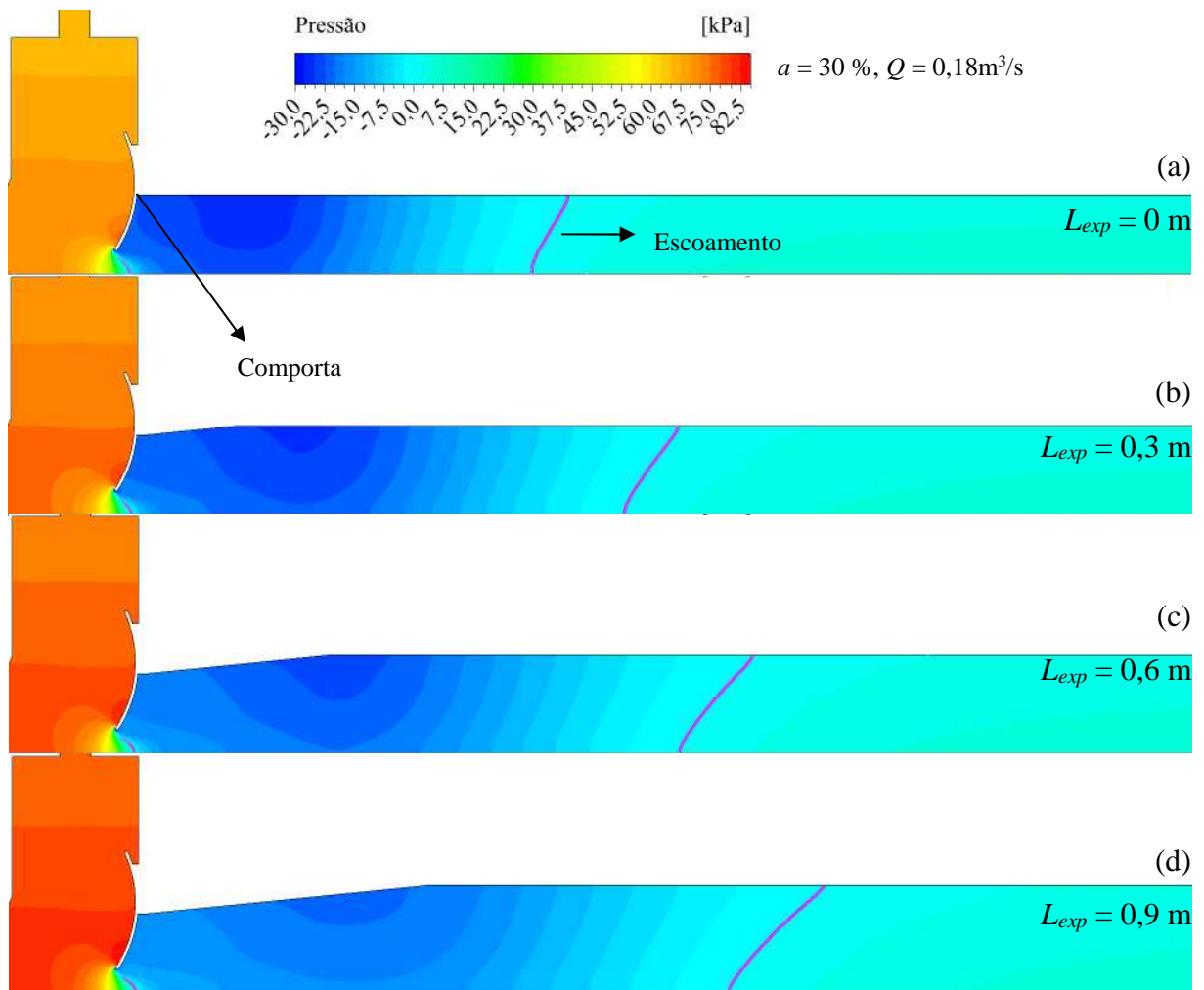
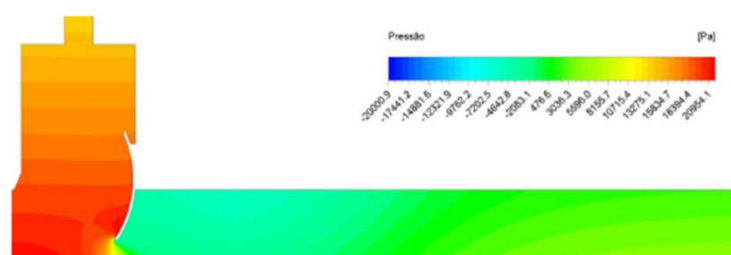


Figura 12 – Campos de pressão para diferentes condições de expansão.(abertura = 30 % e vazão = 0,18 m<sup>3</sup>/s.)

(fonte: adaptado de Santos, 2012).

Dalla Corte (2012), também por meio do software comercial Ansys CFX, simulou a ocorrência de fluxo, por galeria tradicional, a jusante de comporta segmento invertida e concluiu que há uma diminuição da pressão, abaixo e a jusante da comporta, e que os diferenciais de pressão tornam-se mais acentuados à medida que a comporta fecha, Figura 13.



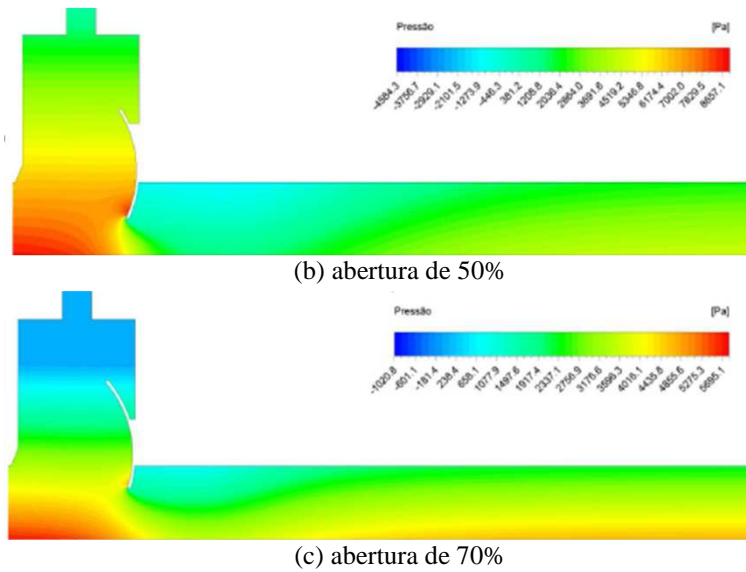


Figura 13 – Campos de pressão para vazão de 90l/s e diferentes porcentagens de abertura.

(fonte:Dalla Corte, 2012)

Battiston (2013), utilizando o software Flow-3D, comparou as pressões médias obtidas em modelo físico com os resultados oriundos de simulação numérica e concluiu que as simulações obtiveram sucesso, pois houve conformidade entre os resultados. A autora esclarece que as maiores diferenças absolutas foram 0,097 mca para a pressão média na base da comporta, 0,036 mca para a pressão mínima na base do conduto a jusante da comporta e 0,152 mca para a pressão mínima a jusante da comporta no teto. Na Figura 14 pode ser visualizada a comparação entre os resultados para a condição de 60% de abertura da comporta, vazão de 220 l/s na base da galeria.

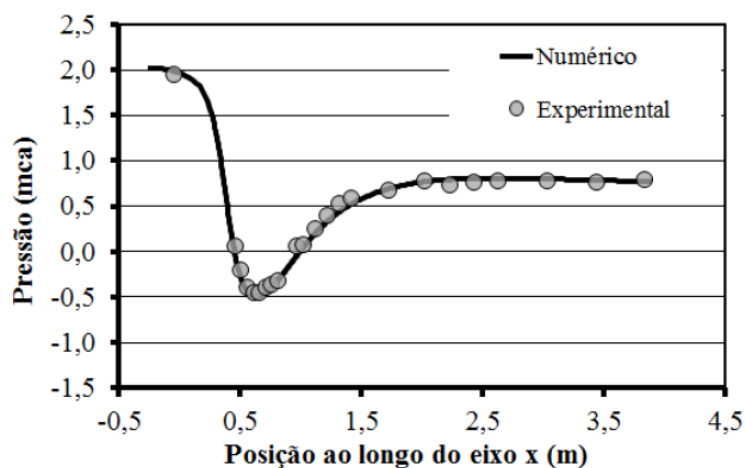


Figura 14 – Comparação entre o resultado da simulação numérica com o obtido em modelo físico reduzido na condição de 60% de abertura da comporta e vazão de 220 l/s.

(fonte: Battiston, 2013)

A autora realizou comparações entre as velocidades obtidas no conduto e concluiu que as velocidades obtidas numericamente apresentam a mesma ordem de grandeza que as obtidas experimentalmente. Também obteve, via simulação numérica, as pressões que ocorrem no conduto, Figura 15.

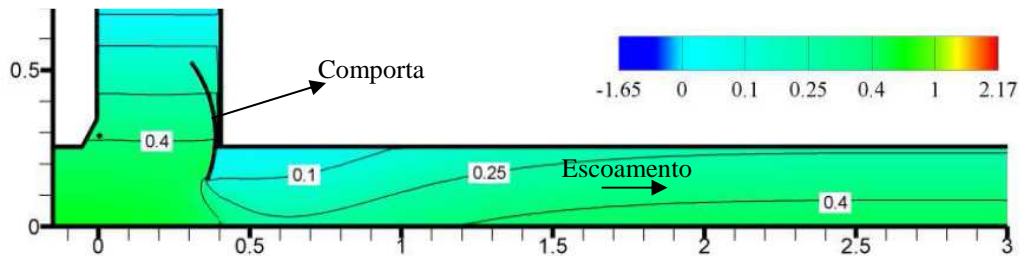


Figura 15 – Pressão média, em mca, para abertura de 60%. No eixo das abscissas tem-se a posição e no eixo das ordenadas a altura do conduto.

(fonte: Battiston, 2013)

Battiston (2013) finaliza, acerca das pressões, que com o aumento da vazão a conversão de energia potencial para energia cinética ocorre rapidamente e que a zona de pressões mínimas abrange todo perímetro da galeria.

No que tange ao comportamento das pressões no interior de condutos a jusante de comportas, a bibliografia existente e consultada não apresenta estudos efetivos, apenas alguns poucos trabalhos realizados em protótipos para casos pontuais, como por exemplo, Santos (1998) que apresenta dados da Eclusa de Porto Primavera.

## 4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Os dados experimentais foram obtidos no modelo físico de laboratório, com características genéricas, de uma comporta utilizada em eclusa de navegação. O modelo, localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS, se comparado com o projeto de concepção da eclusa de Tucurí admite a escala geométrica 1:16. O esquema do modelo que contempla um aqueduto no qual foi instalada a comporta pode ser conferido na Figura 16. As principais variáveis envolvidas são: velocidade do escoamento ( $V$ ), abertura da comporta ( $a$ ), altura do conduto ( $D$ ), distâncias das tomadas de pressão a partir da borda da comporta ( $L_i$ ), vazão e pressão, Figura 17.

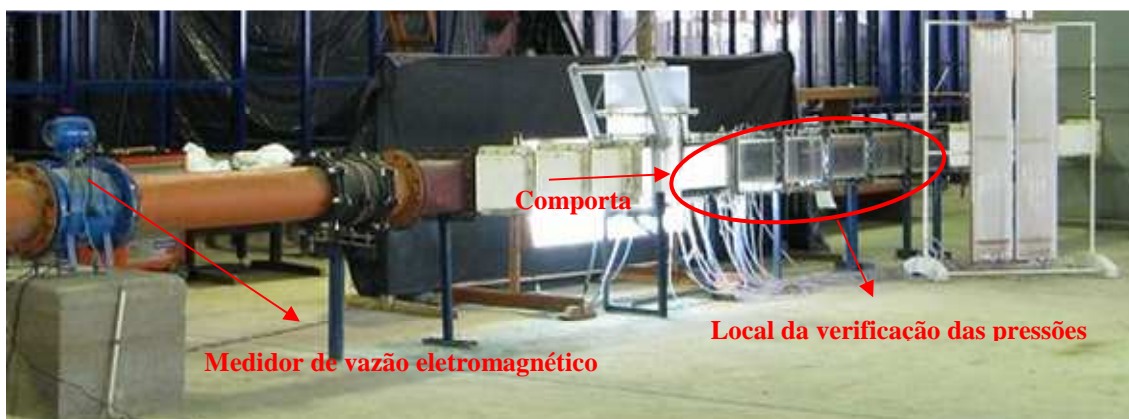


Figura 16 –Modelo físico utilizado para os ensaios da presente pesquisa.

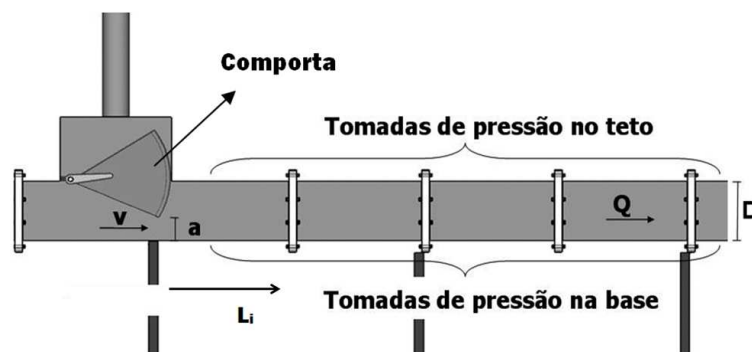


Figura 17 - Principais variáveis envolvidas.

A bancada utilizada apresenta um sistema de alimentação, de seção circular com diâmetro de 250 mm, onde se localiza: um medidor de vazão eletromagnético, uma bomba de 50 CV ligada a um inversor de frequência que permitiu aduzir as diferentes vazões ensaiadas. Faz parte do sistema, ainda: um conduto principal, de seção quadrada com lado ( $D$ ) de 250 mm e 8,9 m de comprimento; uma comporta segmento invertida, raio 380 mm, na porção média do conduto, e parte do trecho, a jusante da comporta, construído em acrílico para visualização do escoamento e facilitar a retirada dos possíveis bolsões de ar acumulados no interior; uma chaminé de equilíbrio com altura

de 2,50 m e um reservatório de jusante com volume máximo total de 7,2 m<sup>3</sup>, utilizado para manter o escoamento afogado.

Durante a execução dos ensaios foram registradas as pressões médias através de piezômetros e “instantâneas” por meio de transdutores de pressão. As tomadas de pressão foram instaladas imediatamente a jusante da comporta, tanto na base como no teto da galeria quadrada, com os espaçamentos entre 5 e 20 cm, conforme pode ser visto na Figura 19. No caso da tomada de valores por meio de piezômetros acompanhava-se o movimento da coluna de água de cada tomada por 3 minutos, era verificada a altura máxima e a altura mínima de água e obtinha-se a média. A média foi o valor utilizado como pressão para a respectiva tomada. Para a obtenção dos dados a partir dos transdutores de pressão eram necessários 10 minutos de ensaio com frequência de medição de 512 Hz. O sinal dos transdutores foi medido por meio de um conversor analógico- digital de 12 bits. As características dos transdutores podem ser conferidas no Quadro 4.

Quantidade	Marca	Faixa de Operação (mca)		Precisão (%F.E)	Posição
30	Sitron	-1,5	1,5	0,30	15 na base do conduto e 15 no teto do conduto
1	Hytronic	-2,1	4,9	0,25	A montante da comporta, na base.

Quadro 4– Características dos transdutores de pressão.

O grau de abertura da comporta ( $a$ ) foi registrado de forma visual com auxílio de um gabarito em forma de semicírculo que se encontrava junto a lateral do conduto, Figura 18. A vazão ( $Q$ ) foi registrada por meio de um medidor eletromagnético de vazão com diâmetro de 250 mm, localizado no conduto de ferro fundido distante 3m e 1,5m das interferências mais próximas a montante e a jusante, respectivamente. O Quadro 5 apresenta as aberturas e vazões ensaiadas. O nível de montante foi verificado por piezômetro bem como o nível de jusante.



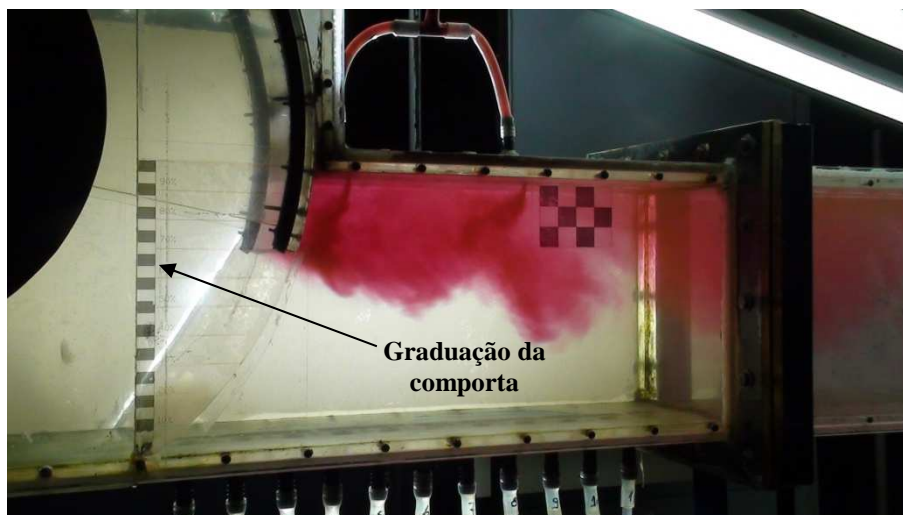


Figura 18 – Detalhe da comporta do modelo na ocasião de ensaio com corante.

Vazão (l/s)	Aberturas								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	100%
22									
Reynolds	$8,8 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^5$	$2,93 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^5$	$1,46 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$8,8 \cdot 10^4$
28									
Reynolds	$1,12 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^5$	$3,73 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$	$2,24 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^5$
32									
Reynolds	$1,28 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^5$	$4,26 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$	$1,56 \cdot 10^5$	$2,13 \cdot 10^5$	$1,83 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$	$1,28 \cdot 10^5$
40									
Reynolds			$5,33 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$	$2,66 \cdot 10^5$	$2,28 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
60									
Reynolds			$8 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$4,8 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$3,42 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$
80									
Reynolds				$8 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^5$	$5,33 \cdot 10^5$	$4,57 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$

Quadro 5 – Resumo dos ensaios. Destaca-se que o número de Reynolds foi calculado na seção plena do conduto, a jusante da comporta.

Os ensaios para obtenção de dados de pressão foram baseados nos experimentos realizados por Battiston (2013), “[...] em regime permanente para diferentes graus de abertura da comporta e carga hidráulica de montante. Não foi permitida a entrada de ar na tubulação durante os ensaios. A cota do vertedouro do reservatório de jusante foi estabelecida a partir da vazão mínima, de forma a garantir que a saída do conduto de jusante estivesse submersa em todos os ensaios. Contudo, o nível de jusante variou em

função da vazão de cada ensaio.”. Destaca-se ainda que, os ensaios foram realizados no mesmo modelo físico, porém em momentos diferentes.

A realização dos ensaios versava no acionamento da bomba com frequência suficiente para passar uma vazão de 40 l/s, com a comporta totalmente aberta para que as bolhas de ar presente na tubulação fossem carregadas pelo escoamento até o reservatório de jusante. Neste mesmo tempo as bolhas de ar presente nas mangueiras dos piezômetros e na membrana dos transdutores eram expulsas. Após a retirada das bolhas o ensaio propriamente dito podia ser iniciado.

Após a captação dos dados, via modelo, iniciava-se o processo de tratamento e análise de dados. Os registros de pressão, tanto os obtidos por piezômetros como os obtidos por transdutores, foram reunidos em uma mesma planilha para que fossem agrupados de acordo com a vazão e porcentagem de abertura. A análise de dados consistia, então, no cálculo do número de Reynolds na seção plena do conduto a jusante da comporta. O valor do CP para cada ensaio e tomada era calculado de acordo com o recomendado por Battiston (2013). A partir disso construíam-se gráficos para cada porcentagem de abertura e encontrada uma curva de ajuste para cada situação de abertura. A metodologia analítica é melhor explorada junto ao capítulo de resultados.

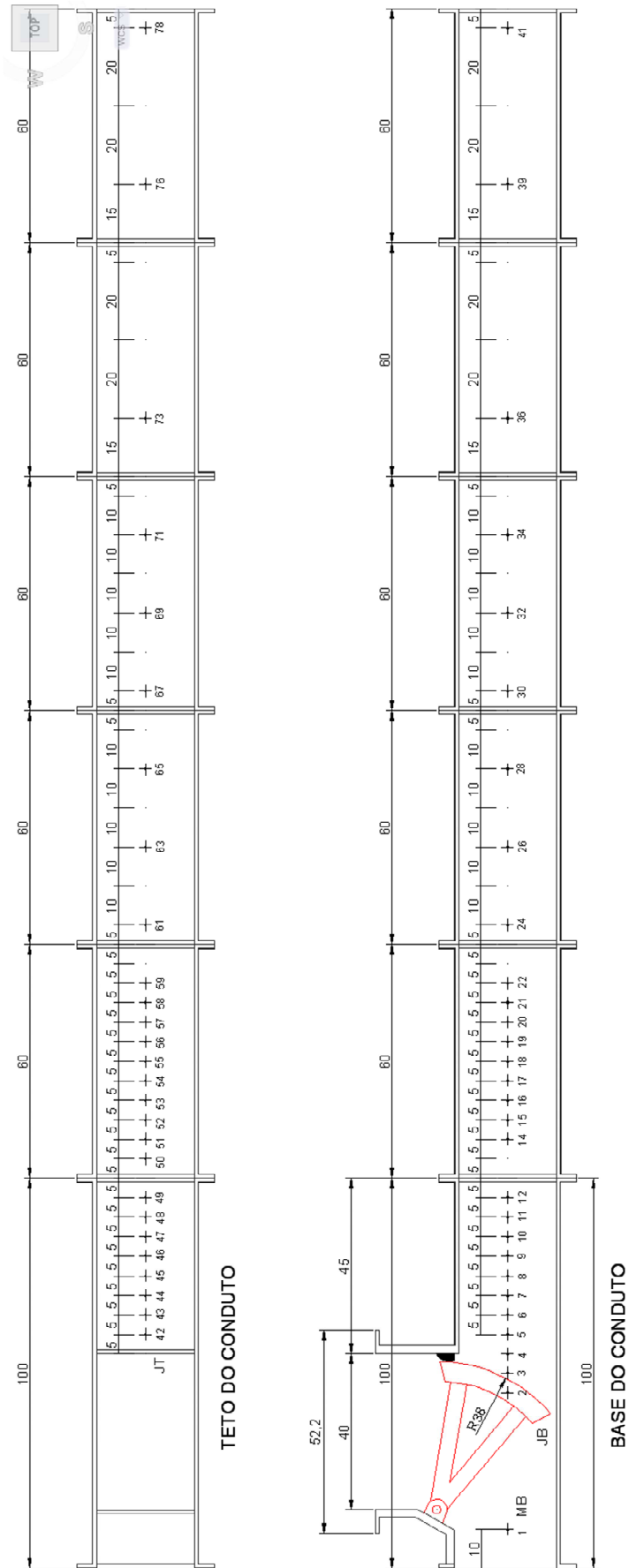


Figura 19 – Mapa da localização dos transdutores.

## **5 ANÁLISE DE DADOS**

Os objetivos da pesquisa englobam a verificação da metodologia sugerida por Battsiton (2013), além de examinar as aberturas da comporta mais críticas e assim identificar em quais as condições pode ser esperada a ocorrência dos processos de erosão e cavitação. Portanto, este capítulo é destinado à apresentação dos resultados.

### **5.1 Comportamento das pressões médias**

#### *5.1.1 Comportamento das pressões médias na base do conduto*

Para a análise do comportamento da pressão média junto à base, os dados foram apresentados em função da sua posição longitudinal ao longo da base do conduto, medida a partir da borda da comporta. As figuras 20 a 27 apresentam o comportamento das pressões médias, na base do conduto, a jusante da comporta para as diferentes aberturas e vazões ensaiadas.

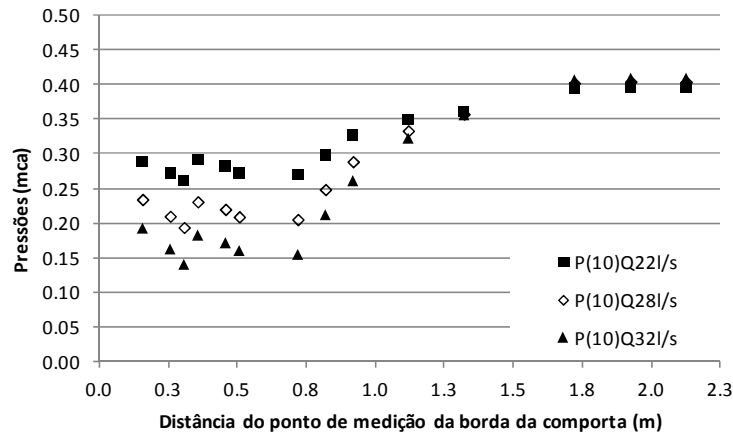


Figura 20 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 10% de abertura.

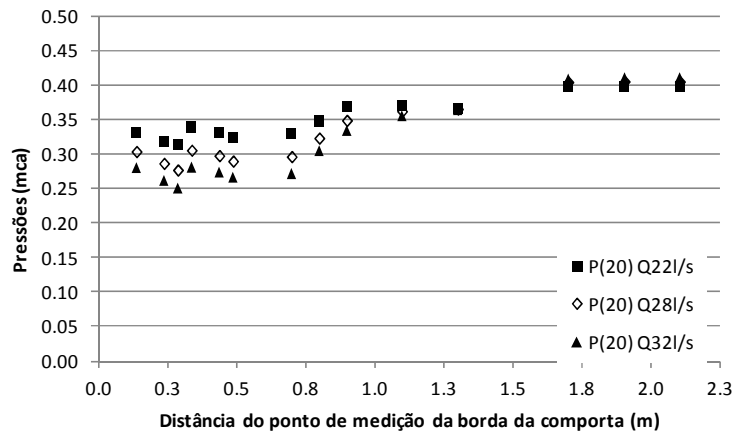


Figura 21 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 20% de abertura.

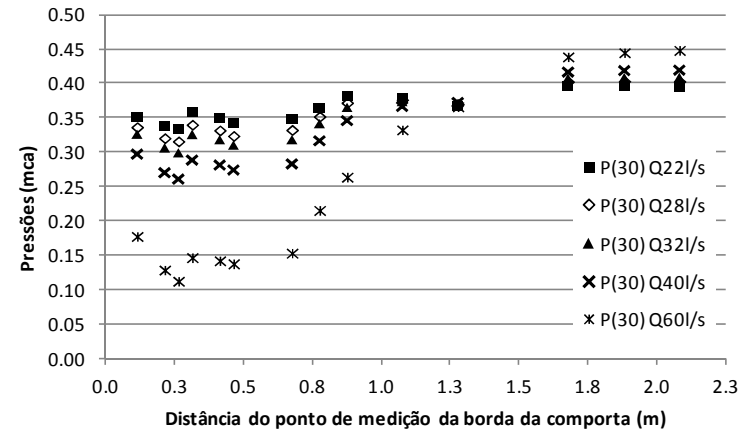


Figura 22 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 30% de abertura.

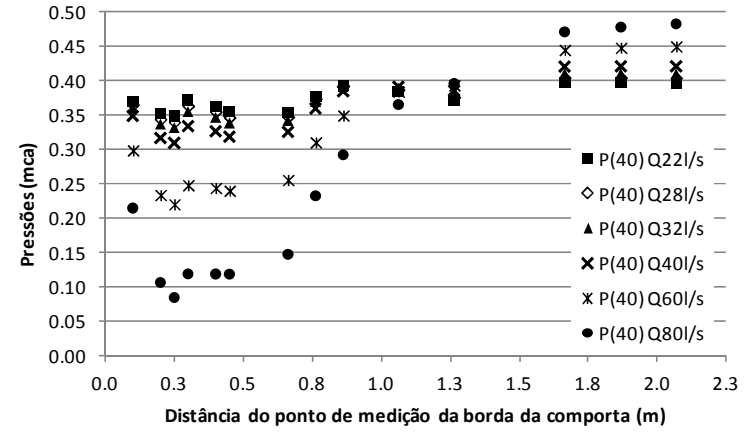


Figura 23 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 40% de abertura.

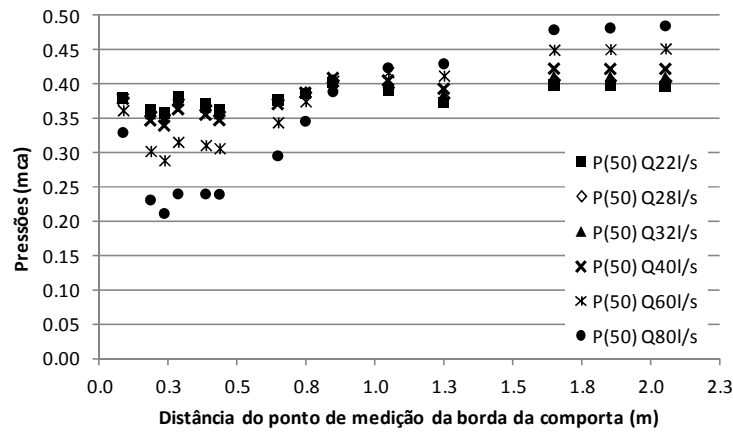


Figura 24 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 50% de abertura.

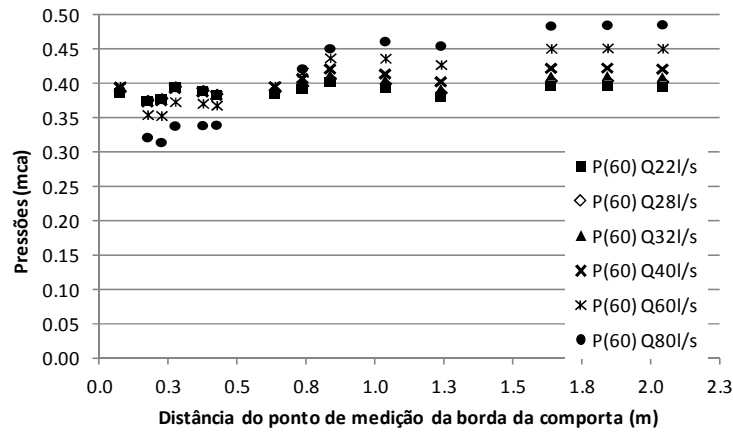


Figura 25 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 60% de abertura.

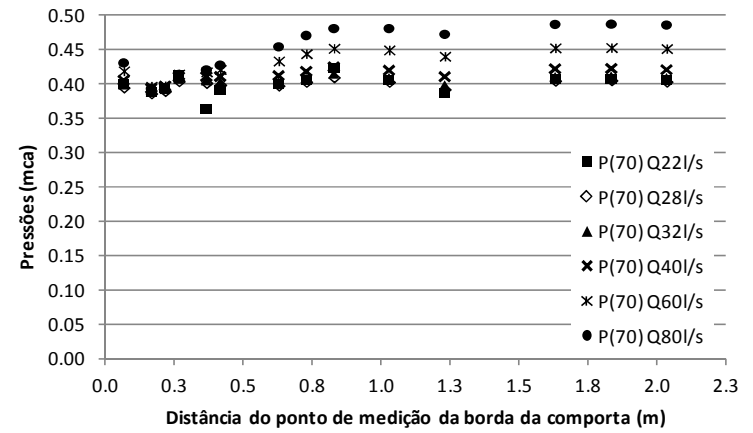


Figura 26 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 70% de abertura.

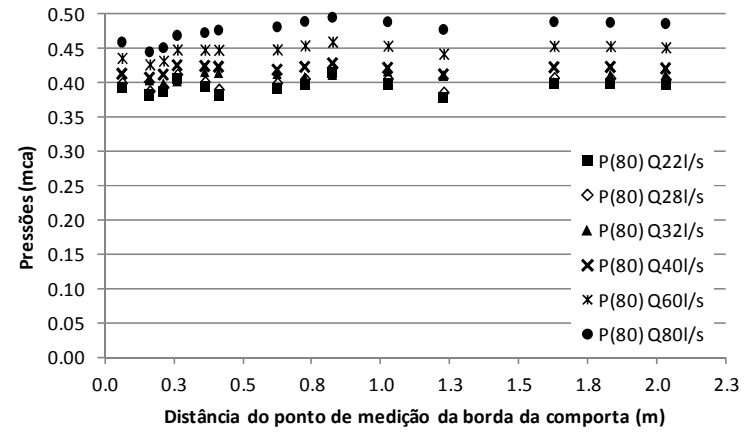


Figura 27 – Comportamento das pressões médias na base com a comporta operando com 80% de abertura.

Partindo da análise das figuras 20 a 27 percebe-se que junto à base:

- a) as pressões médias mínimas ocorrem logo à jusante da comporta e se estendem ao longo de uma distância para depois aumentarem gradualmente;
- b) as pressões começam a aumentar a partir da distância da borda da comporta de  $3,2 D$  independente da porcentagem de abertura;
- c) à medida que a abertura da comporta aumenta para uma mesma vazão, as pressões médias aumentam;
- d) os valores das pressões médias 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;
- e) as pressões médias perdem o efeito da abertura da comporta, a partir de uma certa distância que aumenta com a vazão para uma mesma abertura;
- f) as pressões médias, após o término da influência da comporta, ficam, praticamente, constantes e iguais ao nível de jusante, onde age somente o efeito da perda de carga linear;
- g) a menor pressão média ocorreu na base para a abertura de 40% e vazão de 80 l/s a  $1,2D$  da borda da comporta.

### *5.1.2 Comportamento das pressões médias no teto do conduto*

As figuras 28 a 35 apresentam as pressões médias obtidas junto ao teto do conduto para aberturas definidas. Os dados, da mesma maneira que na base, também estão apresentados em função da sua posição longitudinal de modo a permitir a análise do seu comportamento.

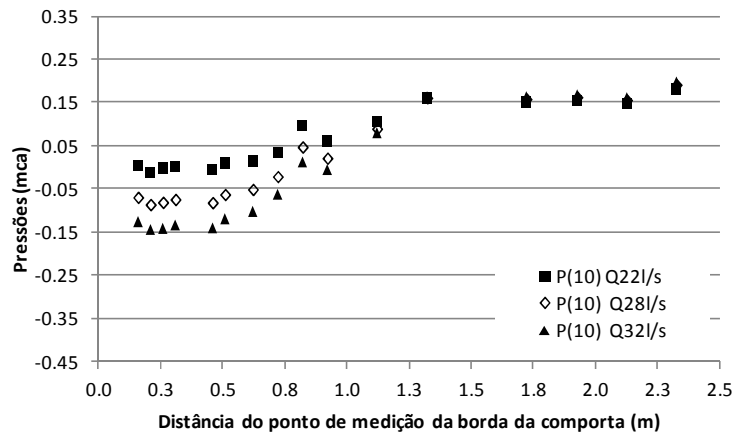


Figura 28 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 10% de abertura.

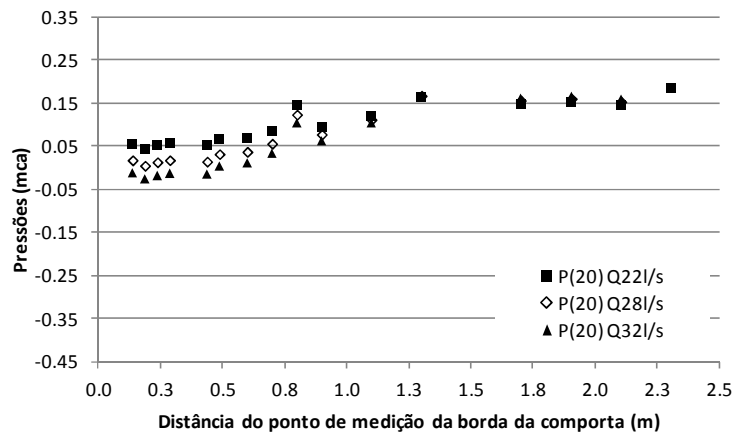


Figura 29 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 20% de abertura.

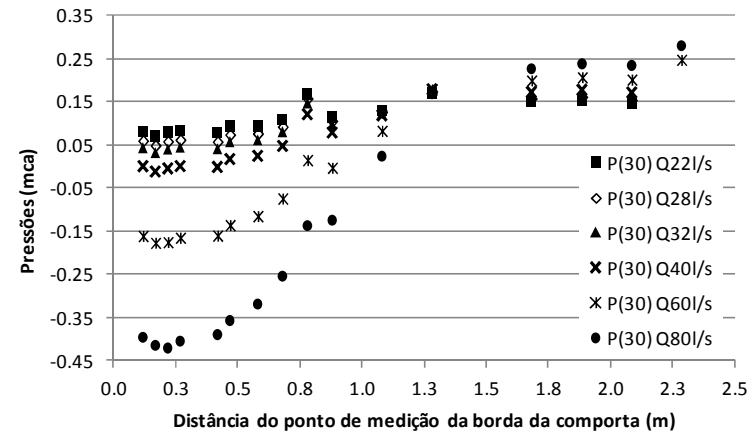


Figura 30 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 30% de abertura.

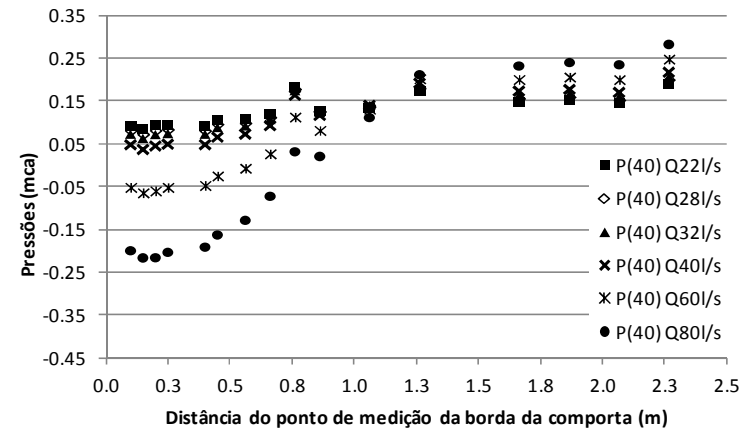


Figura 31 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 40% de abertura.



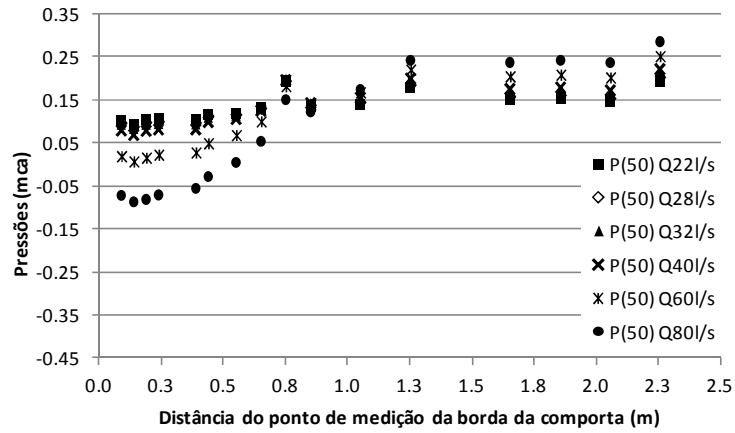


Figura 32 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 50% de abertura.

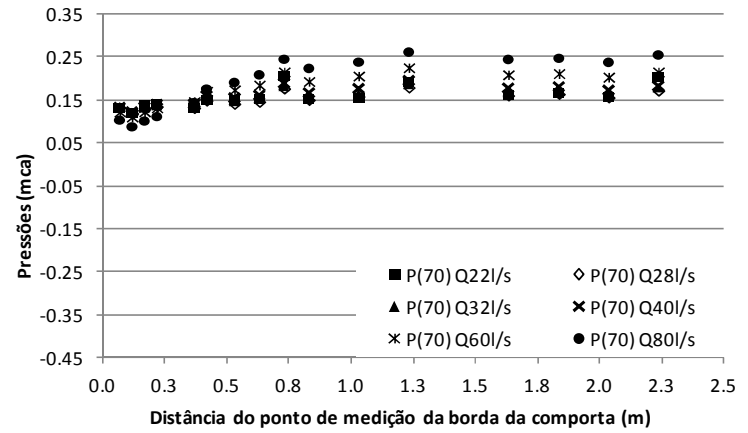


Figura 34 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 70% de abertura.

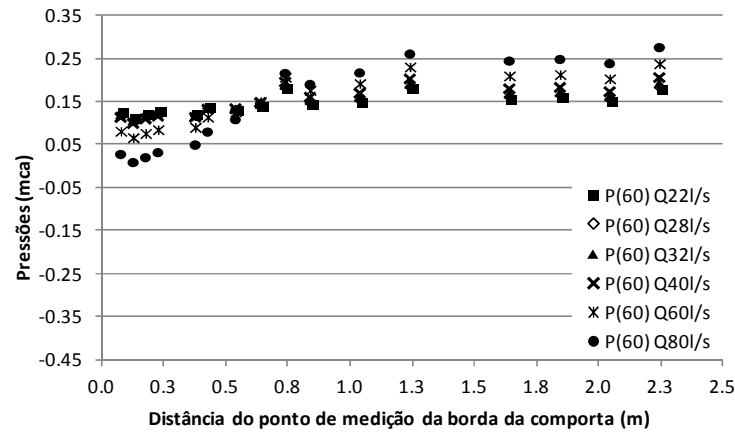


Figura 33 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 60% de abertura.

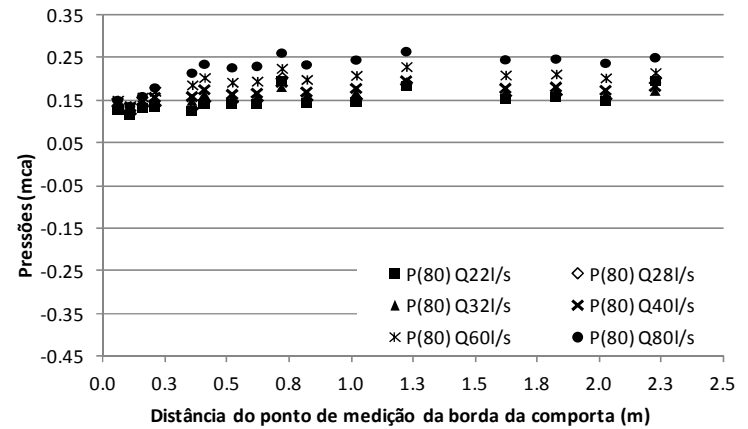


Figura 35 – Comportamento das pressões médias no teto do conduto com a comporta operando com 80% de abertura.

Partindo da análise das figuras apresentadas percebe-se que as pressões médias junto ao teto:

- a) têm comportamento semelhante ao que ocorre na base, mas com valores ainda menores;
- b) as pressões médias mínimas ocorrem logo à jusante da comporta e se estendem ao longo de uma certa distância para depois aumentarem gradualmente;
- c) as pressões médias no teto do conduto ficam positivas a partir da abertura correspondente a 60%, para a faixa de vazões ensaiadas;
- d) a menor pressão média ocorre na abertura de 30% e vazão de 80l/s a uma distância de, aproximadamente, 1,2D da borda da comporta;
- e) os valores das pressões médias 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;
- f) as pressões médias perdem o efeito da abertura da comporta, a partir de 3,2D da comporta;
- g) as pressões médias, após o término da influência da comporta, ficam, praticamente, constantes e iguais ao nível de jusante, sendo influenciadas somente pela perda de carga linear.

Por meio da Figura 36 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. A figura contempla a vazão de 32 l/s para todas as porcentagens de abertura ensaiadas, destaca-se que o comportamento mostrado é o mesmo para as demais vazões tanto no teto como na base da galeria.

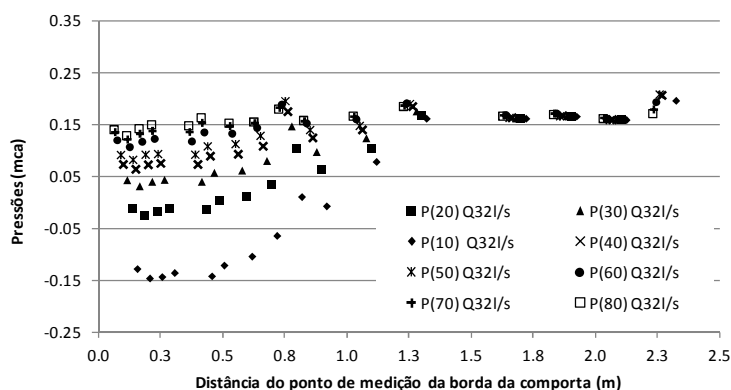


Figura 36 – Comportamento das pressões médias, no teto da galeria, para vazão de 32 l/s e diferentes aberturas da comporta.

## 5.2 Pressões médias mínimas

As menores pressões médias registradas foram de 0,085 mca na base para a abertura de 40% e vazão de 80 l/s, e -0,421 mca no teto para a abertura de 30% e vazão de 80 l/s. A Figura 37 e a Figura 38 mostram o comportamento das pressões médias mínimas em função da vazão do ensaio, onde se observa que para uma mesma abertura as pressões diminuem com o aumento da vazão tanto para o teto como para a base. Para a mesma vazão as pressões diminuem com a abertura.

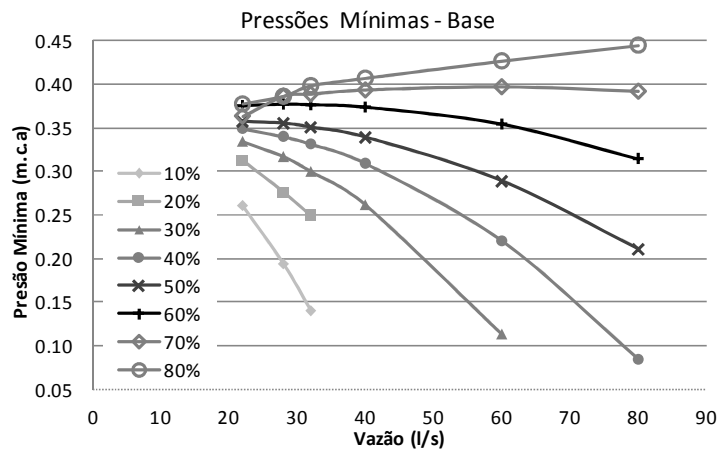


Figura 37 – Pressão média mínima registrada na base do conduto para cada percentagem de abertura em função da vazão.

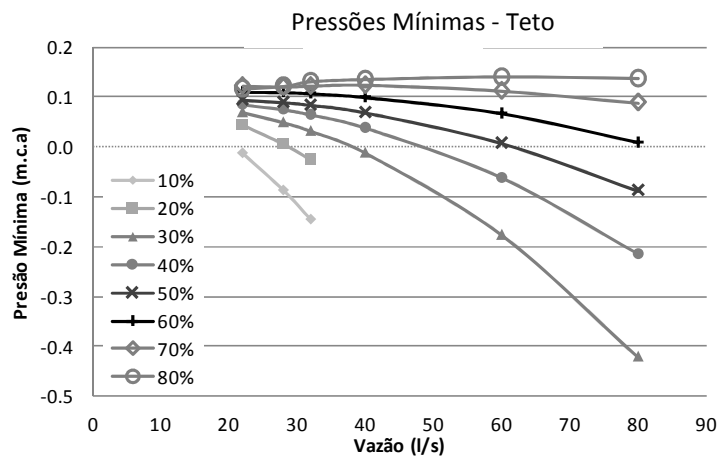


Figura 38 – Pressão média mínima registrada no teto do conduto para cada percentagem de abertura em função da vazão.

### 5.3 Verificação e análise dos dimensionais $C\bar{P}$ e $L_{adm}$

Battiston (2013) recomenda o uso da relação entre os dimensionais  $L_{adm}$  ( $L_{adm} = \frac{L_i}{D-a}$ ) e  $C\bar{P}$  ( $C\bar{P} = \frac{\bar{P}-P_{a100\%}}{V_a^2-V^2}$ ), equações 7 e 8 respectivamente, para escoamentos com número de Reynolds superior a  $3 \times 10^5$  como já mencionado. A Figura 39 mostra o valor do número de Reynolds dos ensaios em função da porcentagem de abertura da comporta.

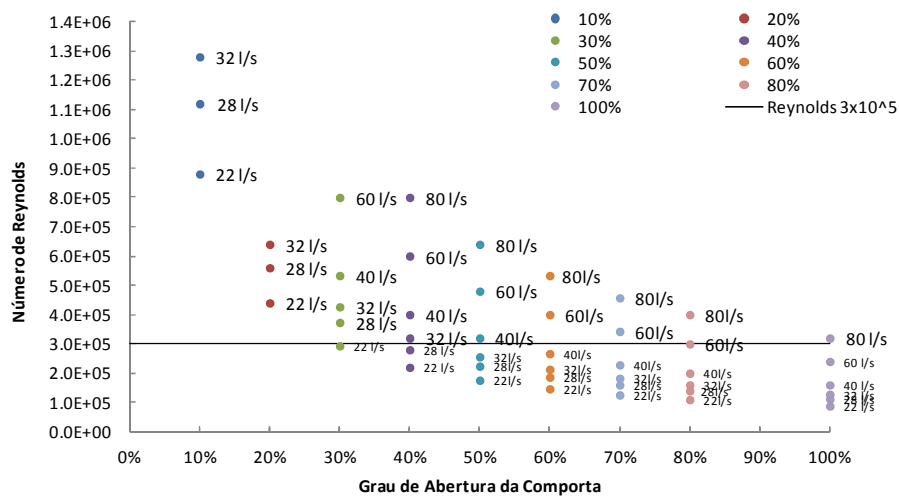


Figura 39 – Simulações e seus respectivos números de Reynolds característicos.

Boa parte dos ensaios realizados na presente pesquisa se encontra abaixo da linha de número de Reynolds igual a  $3 \times 10^5$ . O número dos ensaios acima da marca ficou reduzido, pois apareceram trincas na estrutura da bancada de ensaios. Sendo assim, optou-se por limitar a vazão máxima. No entanto, pode ser obtida, como resultado, qual a influência das menores e maiores vazões na aplicação do método.

#### 5.3.1 Verificação e análise para as pressões na base da galeria

Entre a Figura 40e a Figura 47 podem ser verificadas as relações entre os dimensionais para cada grau de abertura da comporta

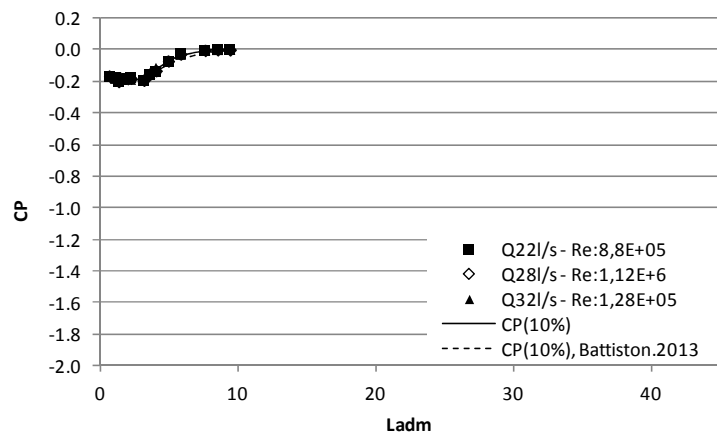


Figura 40 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 10% da comporta.

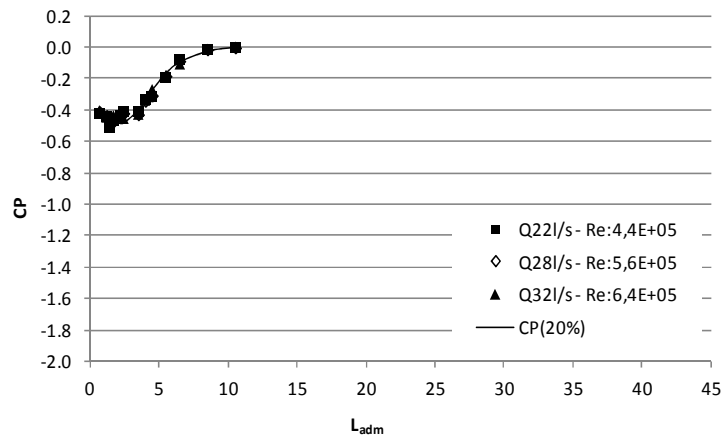


Figura 41 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 20% da comporta.

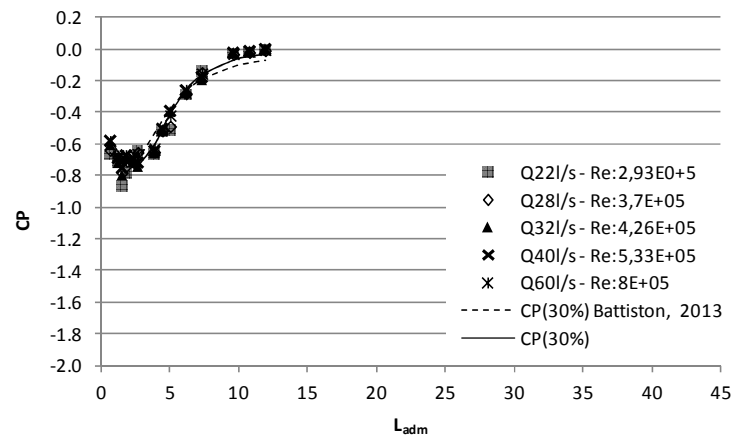


Figura 42 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 30% da comporta.

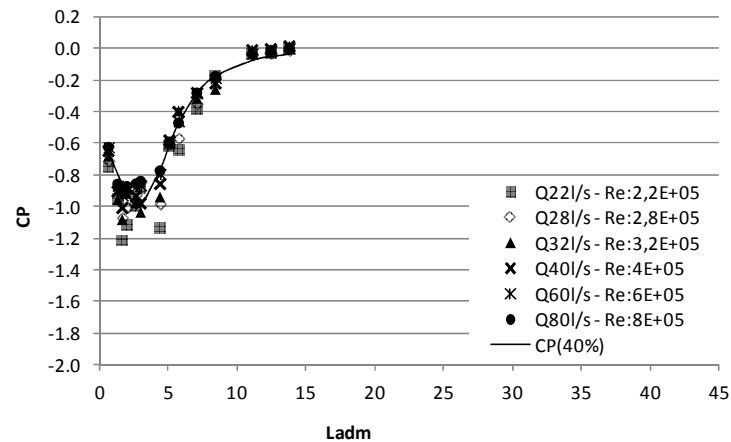


Figura 43 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 40% da comporta.

z

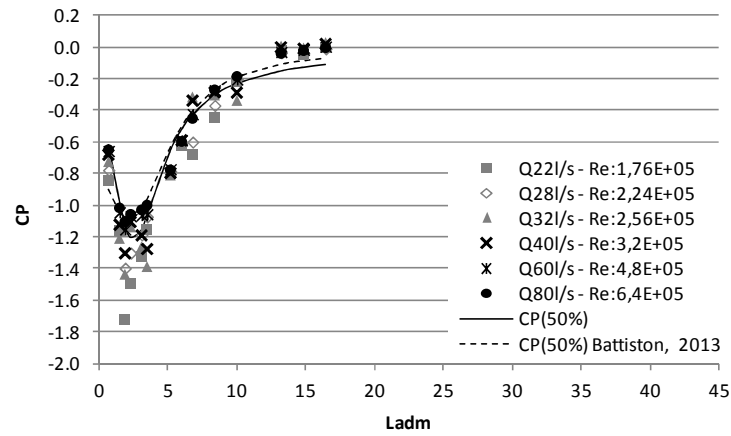


Figura 44 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 50% da comporta.

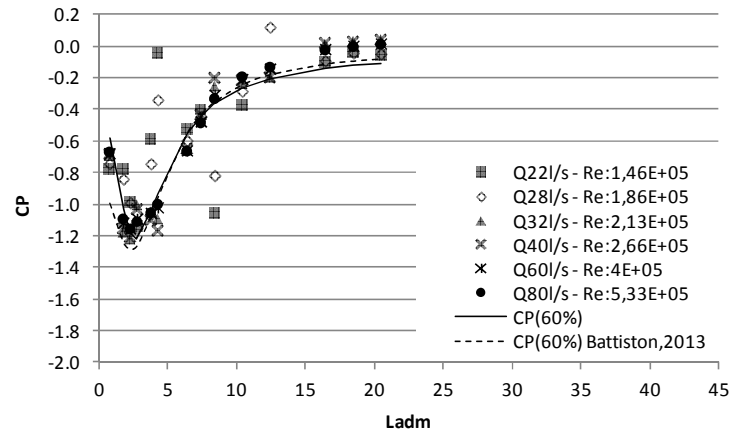


Figura 45 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 60% da comporta.

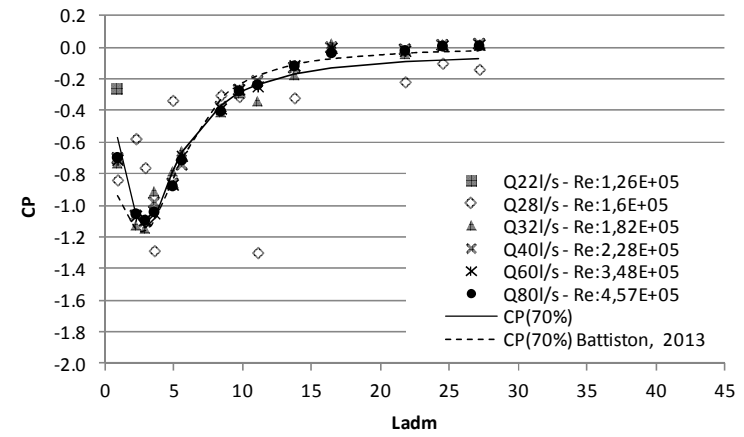


Figura 46 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 70% da comporta.

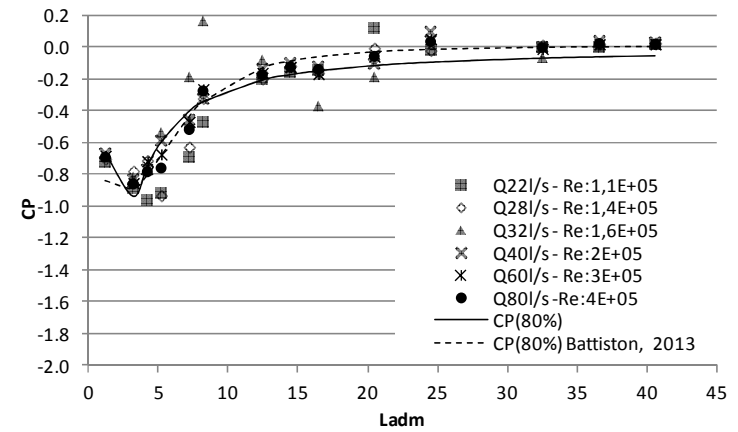


Figura 47 –  $\overline{CP}$ na base para abertura de 80% da comporta.

Pela análise das figuras apresentadas percebe-se que:

- a) os dados provenientes de ensaios com número de Reynolds inferior a  $3 \times 10^5$  diferem da tendência geral, como salientado por Battiston (2013);
- b) os valores de CP tem menor amplitude para as pequenas porcentagens de abertura, 10% a 30%;
- c) o menor valor obtido para CP foi -1,2 na posição adimensional em torno de 2,5 na abertura de 50%;
- d) os valores mínimos de CP se encontram entre a posição adimensional  $L_{adm1}$  e  $L_{adm6}$ ;
- e) as curvas obtidas na presente pesquisa apresentam boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston (2013), com uma variação máxima de cerca de -0,4 no coeficiente CP para a abertura de 60%, e logo após a comporta;
- f) utilizando vazões menores, no caso da presente pesquisa, e porcentagens de aberturas extras, 20% e 40%, os resultados não apresentaram discrepâncias.

Na Figura 48 são apresentadas as curvas finais de CP para todas as aberturas, no caso da base da galeria.

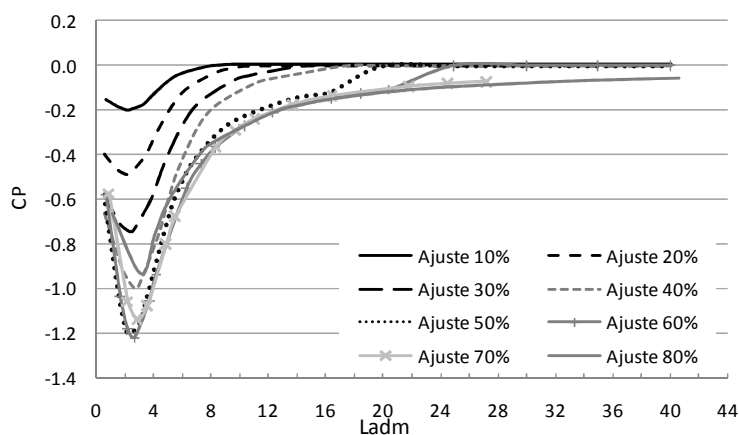


Figura 48 – Curvas finais para CP de diferentes porcentagens de abertura.

As curvas ajustadas são representadas pela função racional descrita pela equação 9 e os coeficientes estão apresentados no Quadro 6.

$$C\bar{P} = \frac{a + b \cdot L_{adm}}{1 + c \cdot L_{adm} + d \cdot L_{adm}^2}$$

Equação 9

Abert.	Coeficientes				R <sup>2</sup>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
10%	-0,1288	0,0151	-0,3859	0,0665	0,96
20%	-0,3372	0,0315	-0,3378	0,0608	0,95
30%	-0,4857	0,0272	-0,3202	0,0581	0,96
40%	-0,5383	0,0179	-0,3427	0,0573	0,96
50%	-0,3663	-0,1396	-0,4356	0,1083	0,97
60%	-0,2895	-0,1816	-0,4199	0,1059	0,97
70%	-0,2897	-0,1358	-0,396	0,0887	0,98
80%	-0,0556	-0,0328	-0,4519	0,1587	0,97

Quadro 6 – Coeficiente para a equação 9 para obtenção do valor de CP para a base da galeria.

### 5.3.2 Verificação e análise para as pressões no teto da galeria

Do mesmo modo que para a base, ajustes são sugeridos para a relação dos adimensionais no teto do conduto, Figura 49 a Figura 56.



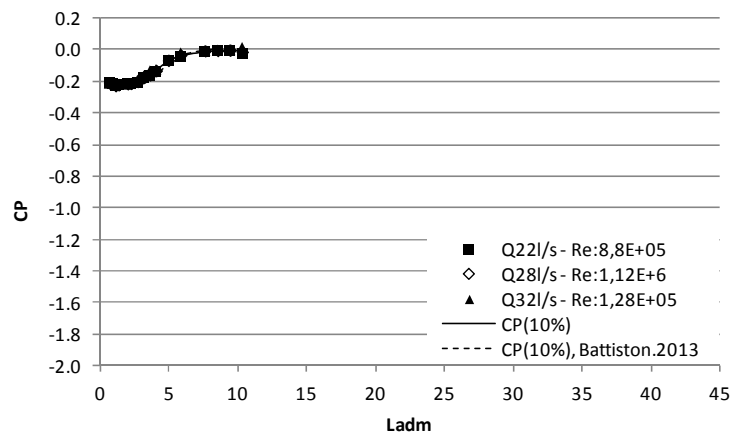


Figura 49 –  $\overline{C_P}$ no tetopara abertura de 10% da comporta.

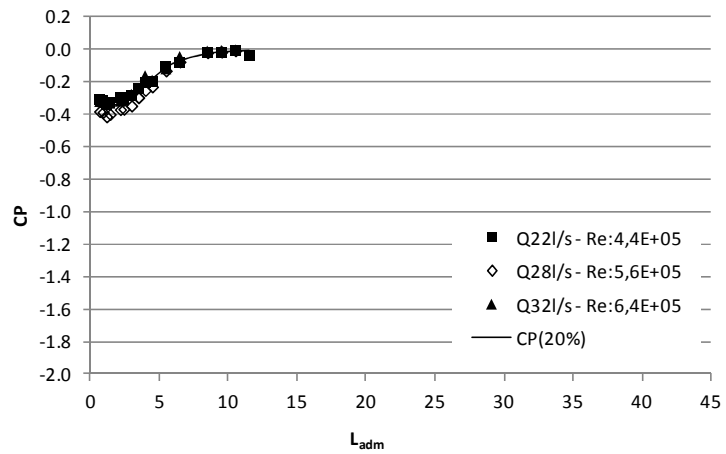


Figura 50 –  $\overline{C_P}$ no teto para abertura de 20% da comporta.

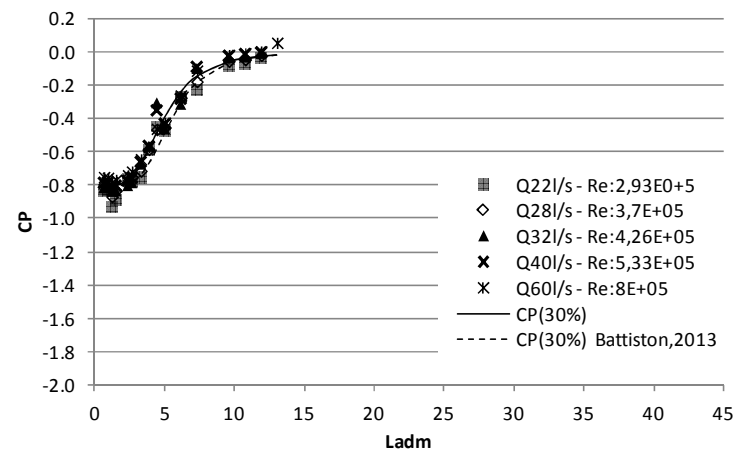


Figura 51 –  $\overline{C_P}$ no teto para abertura de 30% da comporta.

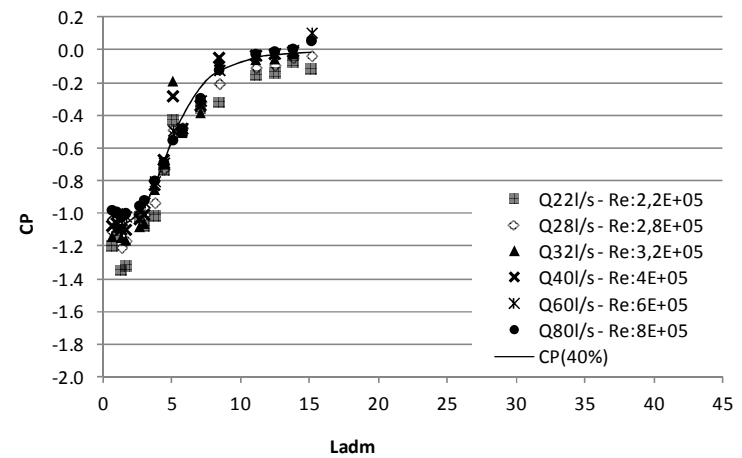


Figura 52 –  $\overline{C_P}$ no tetopara abertura de 40% da comporta.

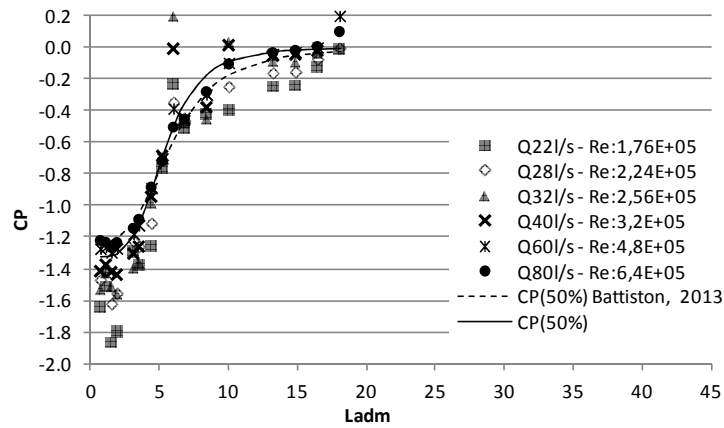


Figura 53 –  $\overline{CP}$ no teto para abertura de 50% da comporta.

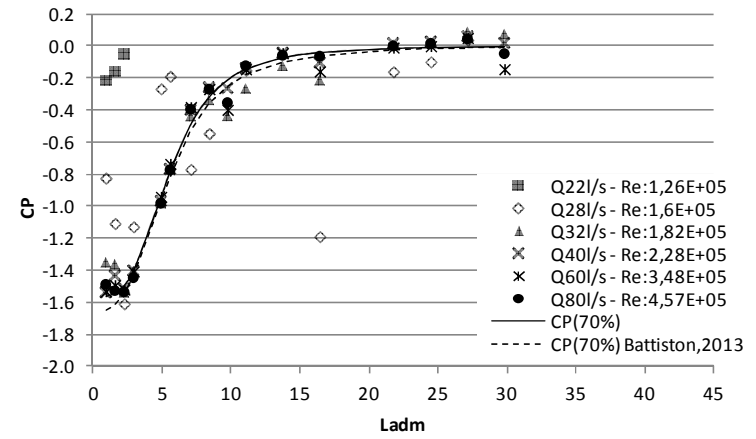


Figura 55 –  $\overline{CP}$ no teto para abertura de 70% da comporta.

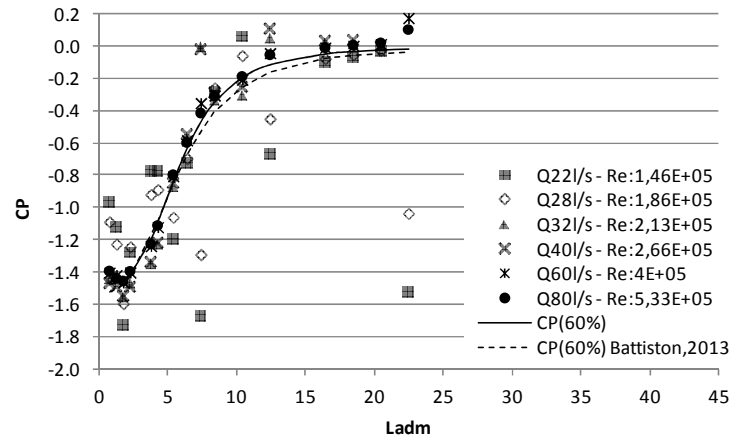


Figura 54 –  $\overline{CP}$ no tetopara abertura de 60% da comporta.

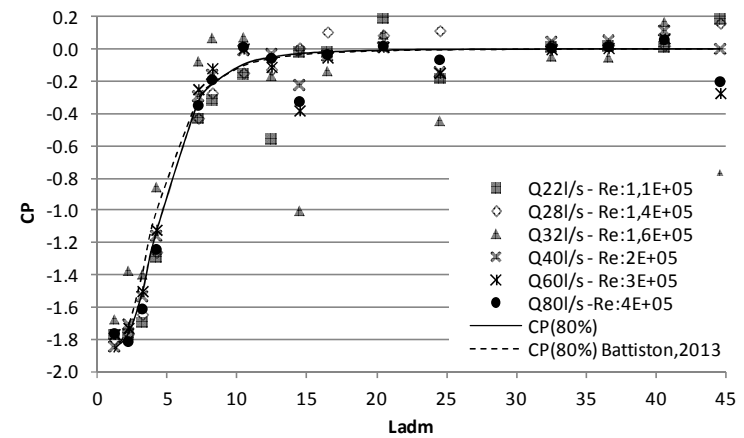


Figura 56 –  $\overline{CP}$ no teto para abertura de 80% da comporta.

Após a observação dos gráficos apresentados pelas figuras percebe-se que:

- a) os dados provenientes de ensaios com número de Reynolds inferior a  $3 \times 10^5$  diferem da tendência geral, como salientado por Battiston (2013);
- b) os valores de CP têm menor amplitude para as pequenas porcentagens de abertura, 10% a 20%;
- c) o menor valor obtido para CP foi -1,85 na posição adimensional em torno de 1,5 na abertura de 80%, no entanto, a menor pressão ocorreu para a abertura de 30%;
- d) os valores de CP crescem até a posição adimensional, em torno de 8 e 10, e tendem a aumentar com a abertura. A partir dessa posição os valores se estabilizam em torno de CP=0 (zero);
- e) as curvas obtidas na presente pesquisa apresentam boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston, (2013), com uma variação máxima de -0,1 no coeficiente CP para a abertura de 50%, em torno da posição adimensional 8;
- f) utilizando vazões menores, no caso da presente pesquisa, e porcentagens de aberturas extras, 20% e 40%, os resultados não apresentaram discrepâncias.

Na Figura 57 são apresentadas as curvas para todas as aberturas no caso do teto da galeria.

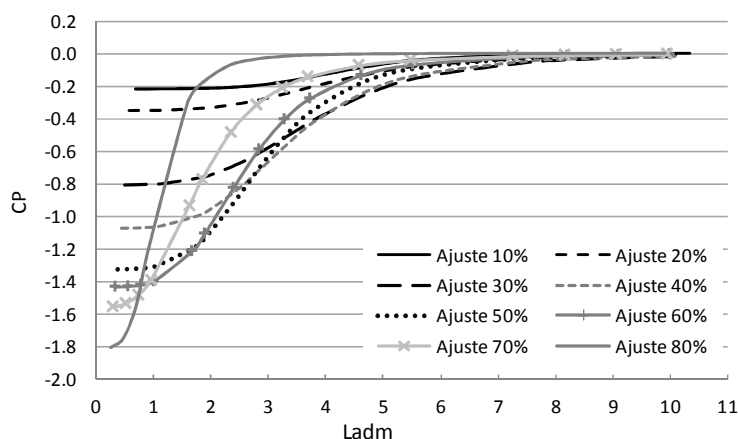


Figura 57 – Curvas finais para CP de diferentes porcentagens de abertura no teto do conduto

As curvas ajustadas são representadas pela função racional descrita pela equação 10 e os coeficientes estão apresentados no Quadro 7.

$$C\bar{P} = \frac{1}{a + b \cdot L_{adm}^c}$$

Equação 10

Abert.	Coeficientes			R <sup>2</sup>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
10%	-4,55	-0,0022	5,2422	0,99
20%	-2,8496	-0,006	4,0225	0,98
30%	-1,2311	-0,0026	3,8491	0,99
40%	-0,9309	-0,0015	3,946	0,97
50%	-0,7546	-0,0009	4,0756	0,97
60%	-0,676	-0,0021	3,2731	0,98
70%	-0,6397	-0,0023	3,2875	0,99
80%	-0,5339	-0,0017	3,6843	0,99

Quadro 7 – Coeficiente para a equação 10 para obtenção do valor de CP para o teto da galeria.

Na Figura 58 e na Figura 59 são apresentados os menores valores do CP's obtidos e comparados com os mínimos apontados por Battiston (2013). Percebe-se que as curvas apresentam a mesma tendência.

No caso da base para o CP mínimo sugerem-se como aberturas que demandam maior cuidado as aberturas de 50% a 60%, em contrapartida Battiston, (2013) aponta como menor valor de CP o valor de -1,3 para abertura de 60%. Vale destacar que o presente estudo conta com duas porcentagens de abertura a mais que o trabalho da autora. Sendo assim, como resultado desta pesquisa aconselha-se maior atenção, no que tange as pressões médias, nas aberturas de 40% a 60%.

No caso do teto para o CP mínimo recomenda-se que, à medida que a abertura da comporta aumenta redobre-se a atenção acerca das pressões médias, pois estas tendem a diminuir assim como o valor do CP.

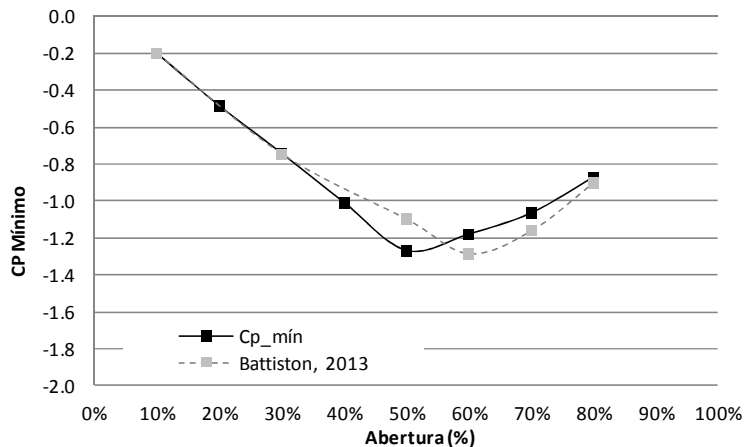


Figura 58 – Coeficientes mínimos para a base em função da porcentagem de abertura.

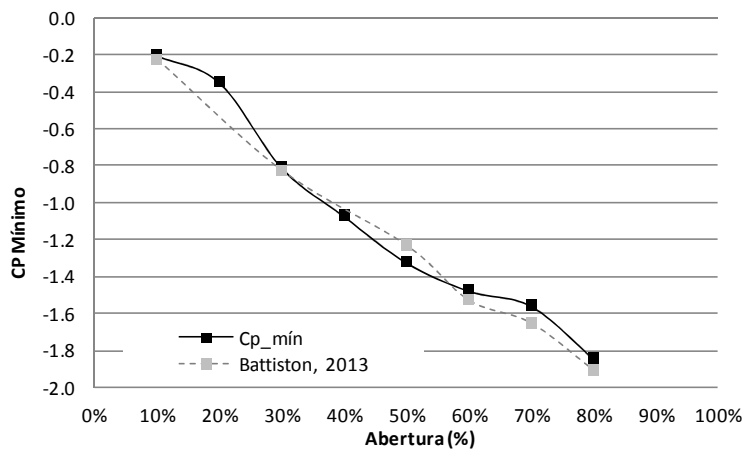


Figura 59 – Coeficientes mínimos para o teto em função da porcentagem de abertura.

A maior diferença entre os CP's mínimos propostos por Battiston, (2013) e os obtidos nesta pesquisa, para a base, é -0,164, diferença de 1, 15%, e ocorre para a porcentagem de abertura de 50%. Já para o teto a maior diferença ocorre para a porcentagem de 70% e tem valor de 0,095, diferença de 0,94%. No Quadro 8 e no Quadro 9 podem ser conferidos os valores dos coeficientes de pressão mínimos recomendados por Battiston, (2013) e os obtidos nesta pesquisa.

Abert.	Presente Pesquisa	Battiston, 2013	Diferença
10%	-0,2024	-0,2046	0,0022
30%	-0,7423	-0,7464	0,0040
50%	-1,2621	-1,0978	-0,1644
60%	-1,1562	-1,2842	0,1280
70%	-1,0648	-1,1626	0,0978
80%	-0,8713	-0,9038	0,0325

Quadro 8 – Coeficientes CP mínimo dos ajustes para a base.

a%	Presente Pesquisa	Battiston, 2013	Diferença
10%	-0,2043	-0,2277	0,0234
30%	-0,8119	-0,8285	0,0166
50%	-1,3248	-1,2333	-0,0915
60%	-1,4774	-1,5307	0,0532
70%	-1,5593	-1,6543	0,0950
80%	-1,8434	-1,9091	0,0657

Quadro 9 – Coeficientes CP mínimo dos ajustes para o teto.

#### **5.4 Comportamento das pressões mínimas, $P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$ .**

O conhecimento das pressões com percentil de 1% e de 0,1% de serem inferiores ou iguais a um certo valor possibilita uma estimativa da tendência do valor mínimo que as pressões podem atingir. Esta abordagem permite uma transposição de valores para protótipo de maneira adequada, permitindo que se avalie o risco de erosão e/ou cavitação.

Em estruturas hidráulicas recomenda-se, como já apresentado no capítulo de revisão bibliográfica, considerar que o concreto resiste à tração máxima de -6 mca (PORTUGAL, 1975). Portanto, nesta pesquisa, admite-se que quando as pressões médias situam-se próximas deste valor, ocorrerá danos a estrutura (situação de bloqueio), ou seja, o concreto estará sujeito a esforços críticos que causam danos imediatos a estrutura. Contudo, quando as pressões  $P_{1\%}$  apresentam valores em torno de -6 mca se supõe que o sistema opera na situação crítica, ou seja, o conduto a jusante estará sujeito a esforços que irão ocasionar danos na galeria a curto prazo. No caso das pressões  $P_{0,1\%}$  permanecerem na faixa inferior a -6 mca, haverá danos à estrutura a longo prazo, portanto esta é a situação incipiente.

##### *5.4.1 Comportamento das pressões 1% na base do conduto.*

Os gráficos compreendidos entre a Figura 60 e a Figura 67 apresentam o comportamento das pressões com probabilidade de 1% de serem inferiores, na base da galeria.

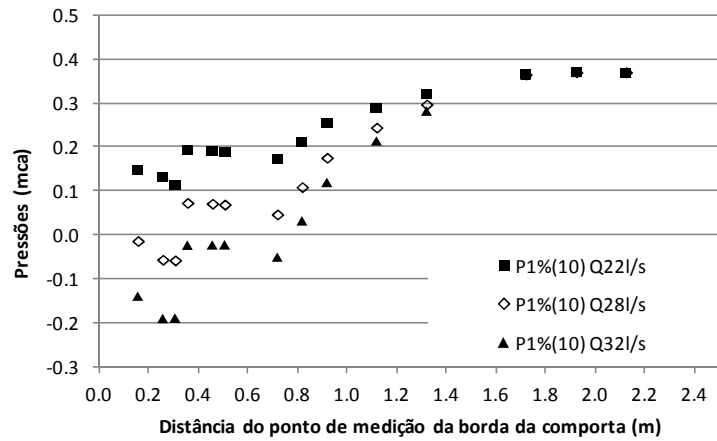


Figura 60 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 10%.

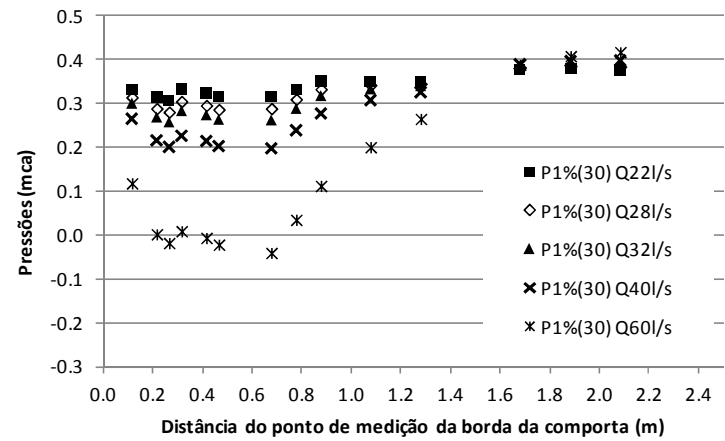


Figura 62 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 30%.

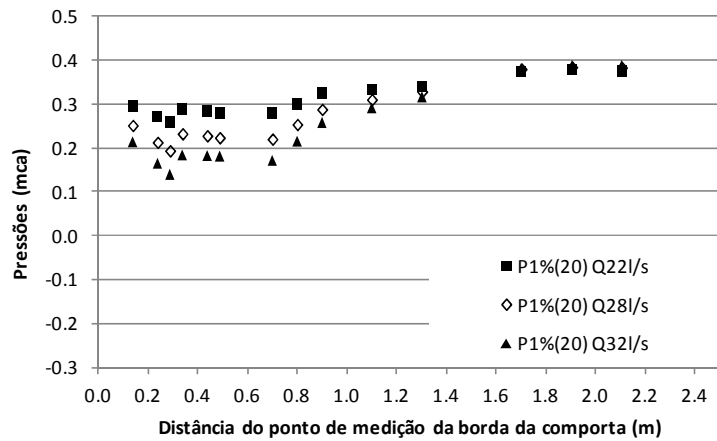


Figura 61 – Comportamento das pressões 1%, de serem inferiores na base do conduto, para abertura de 20%.

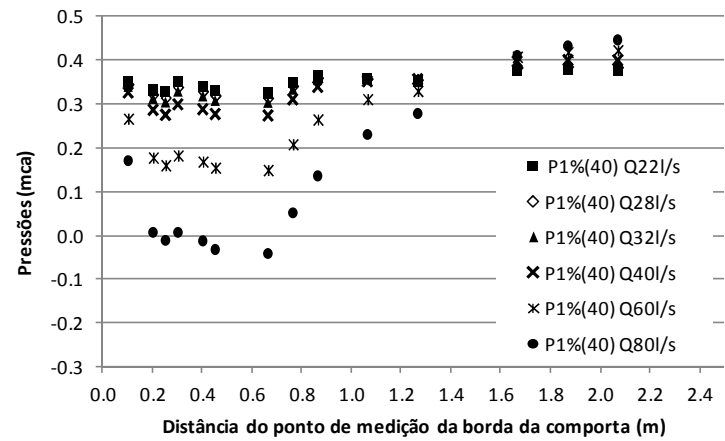


Figura 63 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 40%.



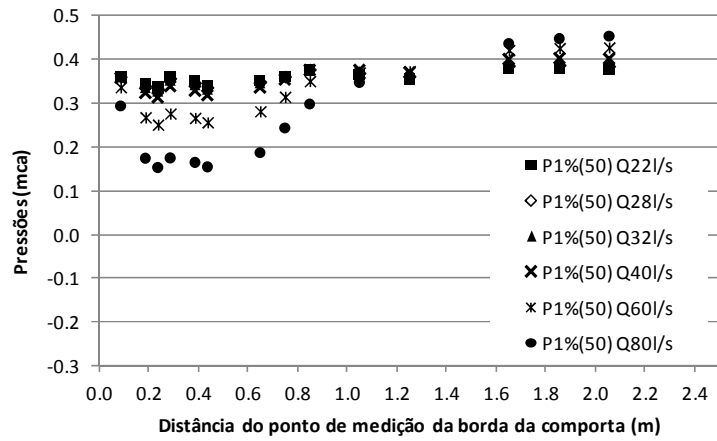


Figura 64 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 50%.

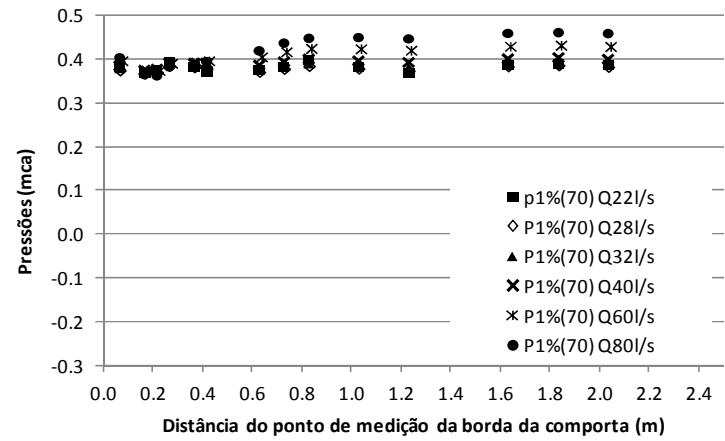


Figura 66 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 70%.

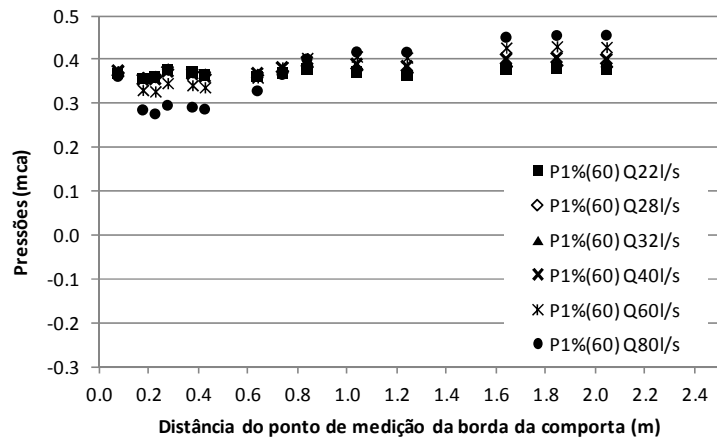


Figura 65 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 60%.

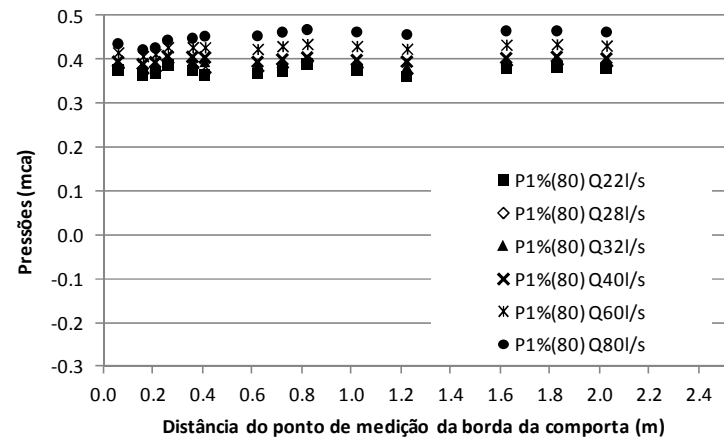


Figura 67 – Comportamento das pressões 1% de serem inferiores, na base do conduto, para abertura de 80%.

A partir da análise das figuras percebe-se que:

- a) o comportamento das pressões 1% segue a mesma tendência das pressões médias, no entanto observa-se que os valores são menores, como era de se esperar;
- b) as pressões  $P_{1\%}$  ocorrem logo à jusante da comporta e se estendem ao longo de uma certa distância para depois aumentarem gradualmente;
- c) o menor valor de pressão 1% ocorreu para a abertura de 10% e vazão de 32 l/s;
- d) do mesmo modo que para o comportamento das pressões médias, o crescimento dos valores tende a se estabilizar em torno dos 0,4 mca, próximo ao nível de jusante;
- e) as pressões  $P_{1\%}$  começam a aumentar a partir da distância da borda da comporta de cerca de 3.2 D, independente da porcentagem de abertura;
- f) os valores das pressões  $P_{1\%}$  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;
- g) as pressões  $P_{1\%}$ , 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 agindo sobre os valores de pressão.

#### 5.4.2 *Comportamento das pressões 1% no teto do conduto.*

Os gráficos compreendidos entre a Figura 68 e a Figura 75 apresentam o comportamento das pressões com probabilidade de 1% de serem inferiores, no teto da galeria.

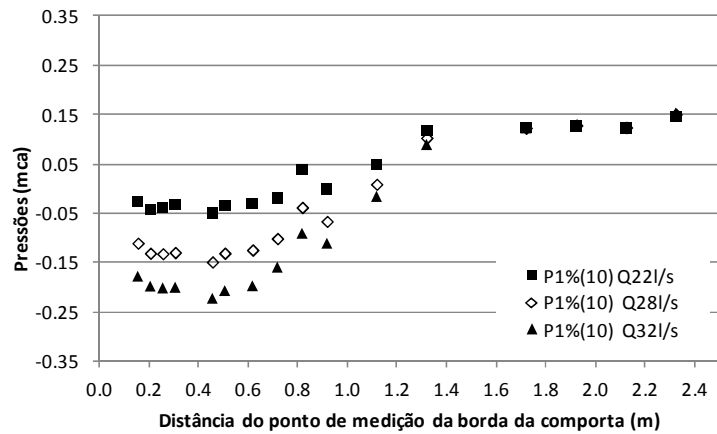


Figura 68 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 10%.

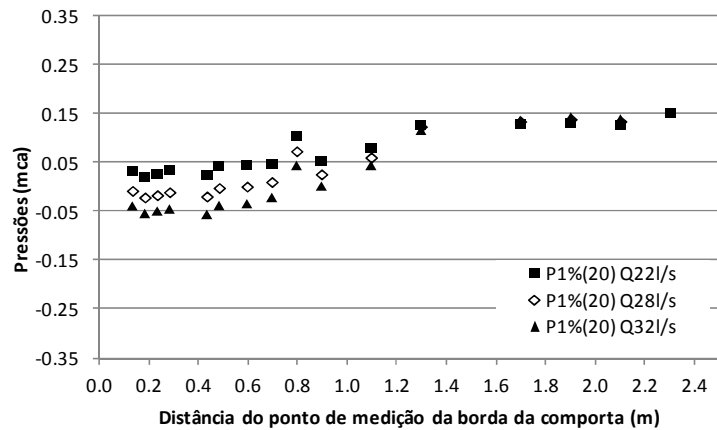


Figura 69 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 20%.

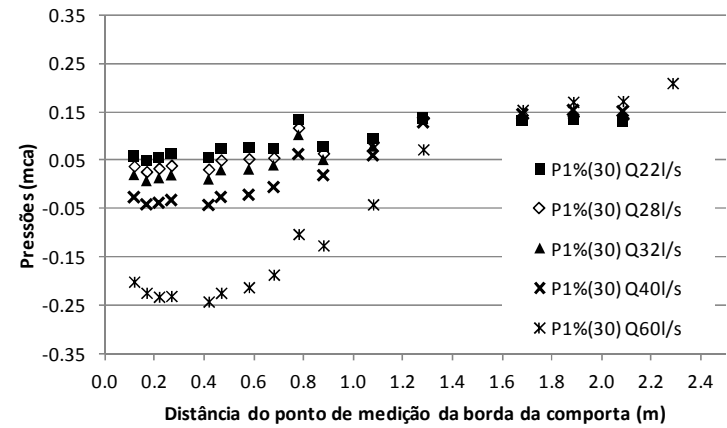


Figura 70 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 30%.

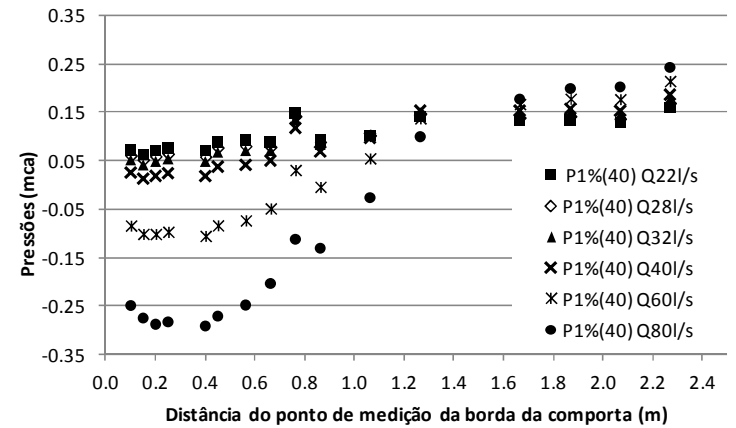


Figura 71 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 40%.

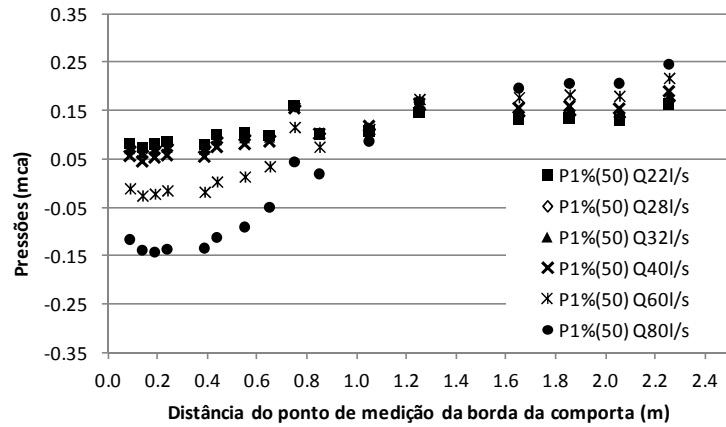


Figura 72 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 50%.

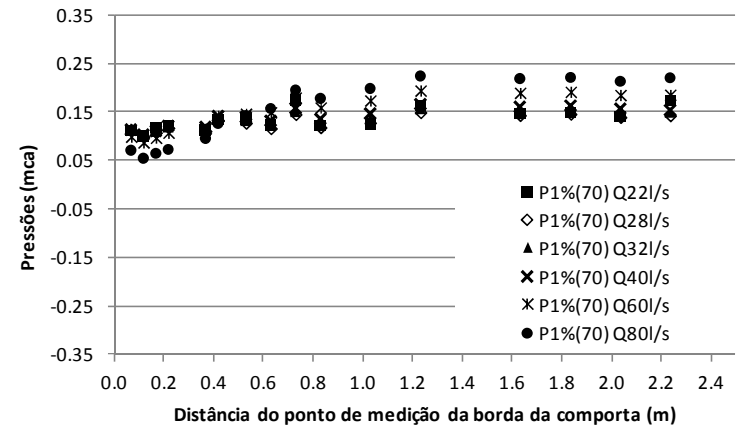


Figura 74 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 70%.

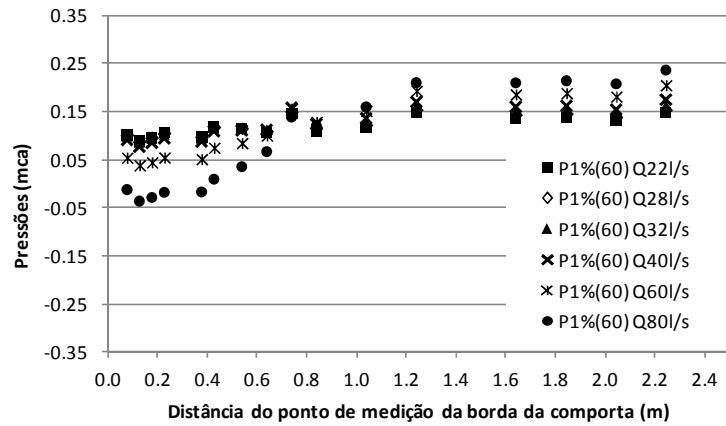


Figura 73 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 60%.

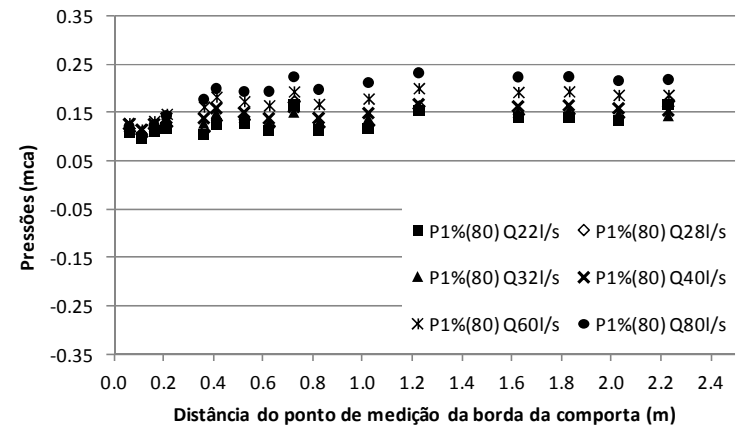


Figura 75 – Comportamento das pressões 1%, no teto do conduto, para abertura de 80%.

A partir da análise das figuras percebe-se que:

- a) as pressões  $P_{1\%}$  no teto do conduto são menores que as pressões  $P_{1\%}$  na base;
- b) as pressões  $P_{1\%}$  ocorrem logo à jusante da comporta e se estendem ao longo de uma distância para depois aumentarem gradualmente;
- c) o menor valor de  $P_{1\%}$ , no teto da galeria, ocorreu para a abertura de 40% e vazão de 80 l/s, chegando a um mínimo de -0,3 mca a uma distância de aproximadamente 1 D da borda da comporta;
- d) o crescimento dos valores das pressões  $P_{1\%}$  tende a se estabilizar em torno dos 0,2 mca. Logo, as pressões  $P_{1\%}$ , 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;
- e) os valores das pressões  $P_{1\%}$  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;

#### *5.4.3 Comportamento das pressões 0,1% na base do conduto.*

Os gráficos compreendidos entre a Figura 76 e a Figura 83 apresentam o comportamento das pressões probabilidade de 0,1% de serem inferiores, na base da galeria.

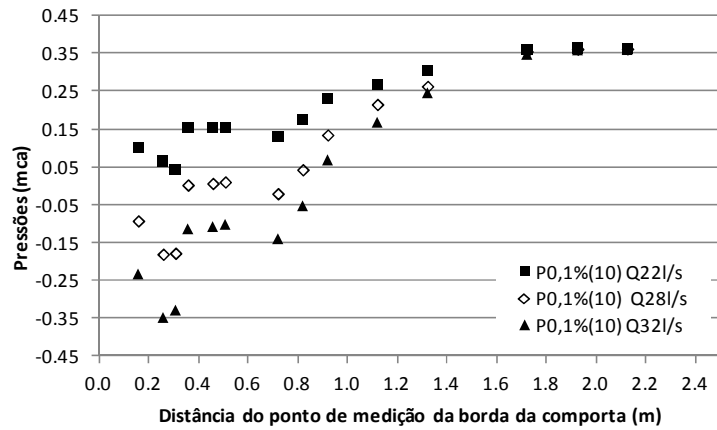


Figura 76 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 10%.

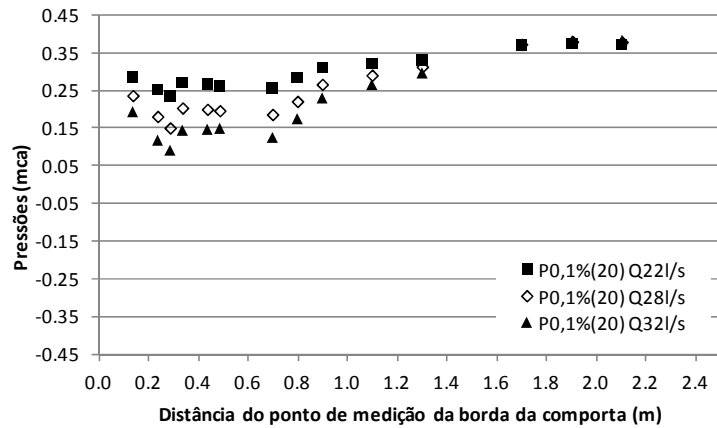


Figura 77 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 20%.

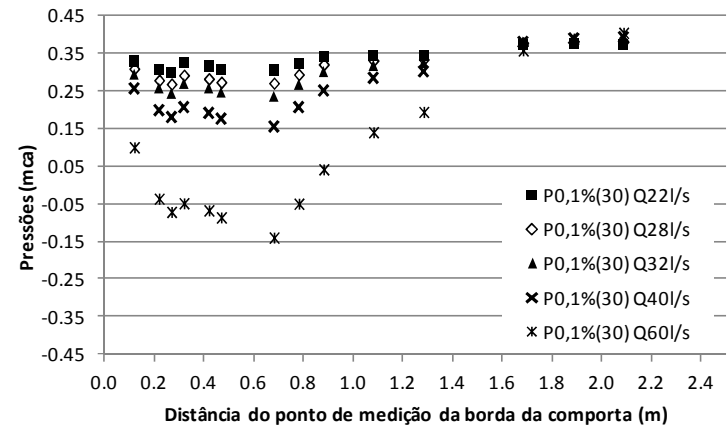


Figura 78 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 30%.

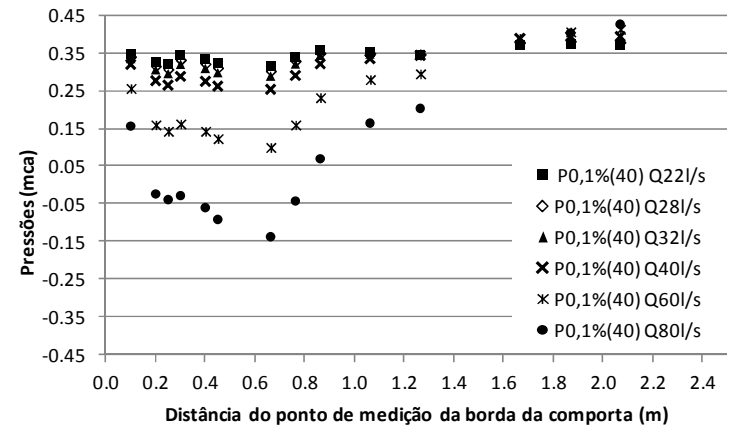


Figura 79 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 40%.

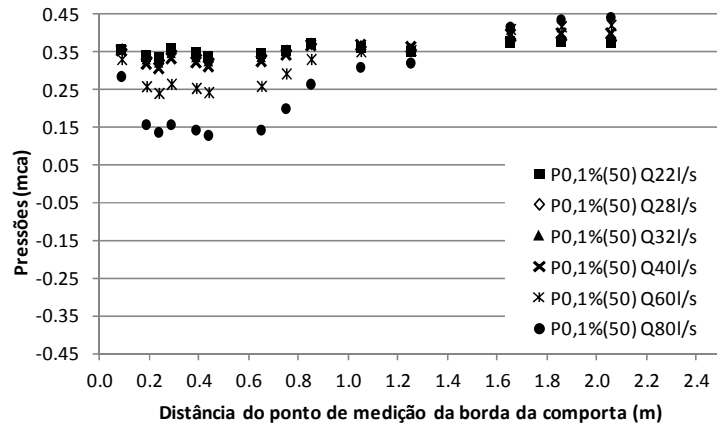


Figura 80 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 50%.

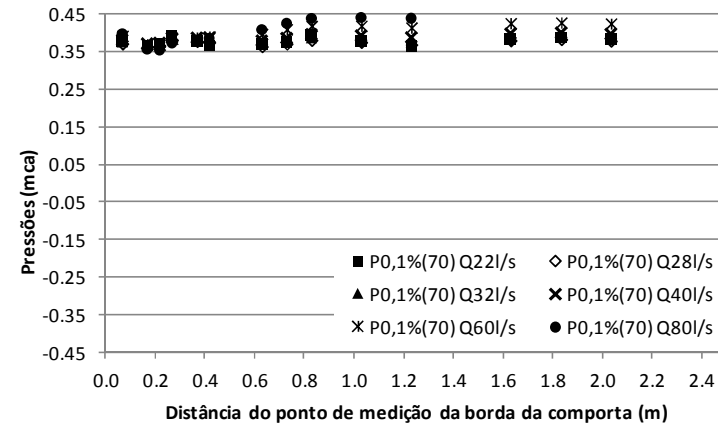


Figura 82 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 70%.

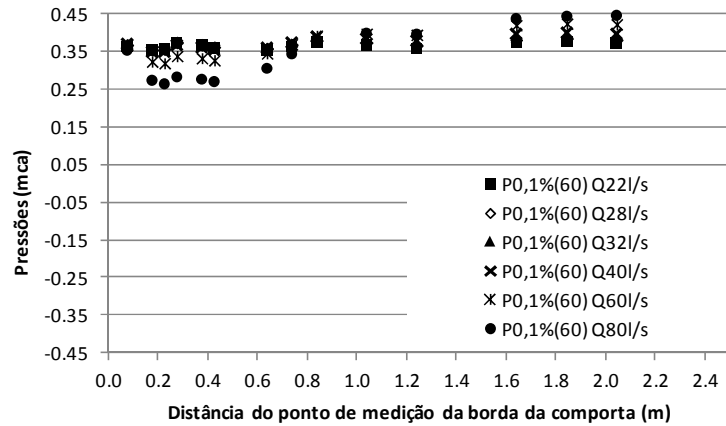


Figura 81 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 60%.

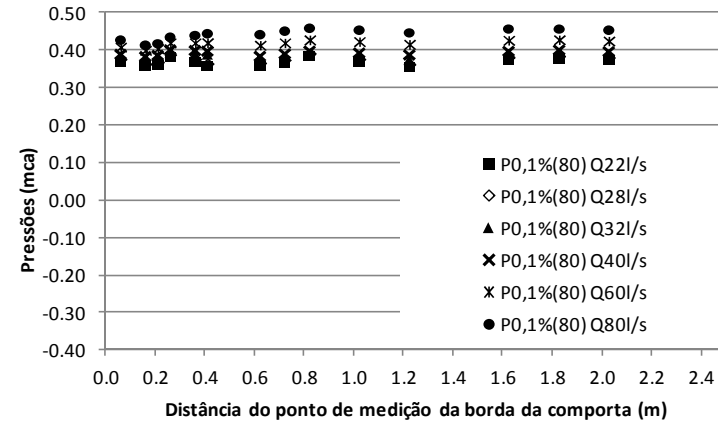


Figura 83 – Comportamento das pressões 0,1%, na base do conduto, para abertura de 80%.

A partir da análise das figuras percebe-se que:

- a) as pressões  $P_{0,1\%}$  ocorrem logo à jusante da comporta e se estendem ao longo de uma certa distância para depois aumentarem gradualmente;
- b) a menor pressão  $P_{0,1\%}$  ocorreu para a abertura de 10% com vazão de 32 l/s. Destaca-se que no caso de pressões médias o menor valor ocorreu para a abertura de 40% e vazão de 80 l/s, no caso das pressões 1% o menor valor ocorreu, também, para a abertura de 10% e vazão de 32 l/s;
- c) as pressões  $P_{0,1\%}$  crescem à medida que se afastam da comporta e tendem a se estabilizar por volta de 0,4 mca a uma distância de 3,2D da borda da comporta. Logo, 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;
- d) 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;

#### *5.4.4 Comportamento das pressões 0,1% no teto do conduto.*

Os gráficos compreendidos entre a Figura 84 e a Figura 91 apresentam o comportamento das pressões com probabilidade de 0,1% de serem inferiores, no teto da galeria.



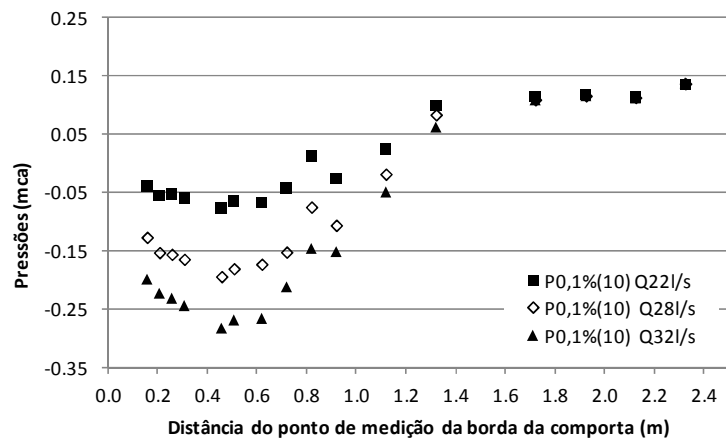


Figura 84 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 10%.

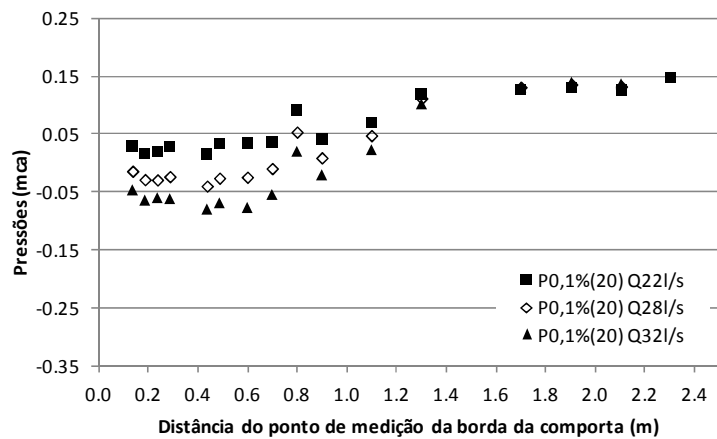


Figura 85 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 20%.

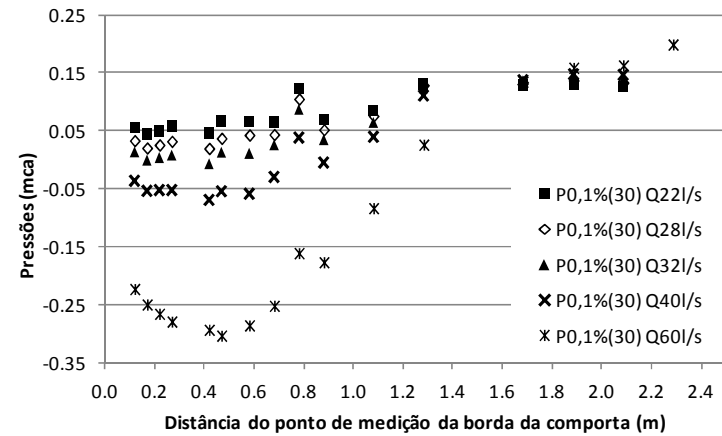


Figura 86 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 30%.

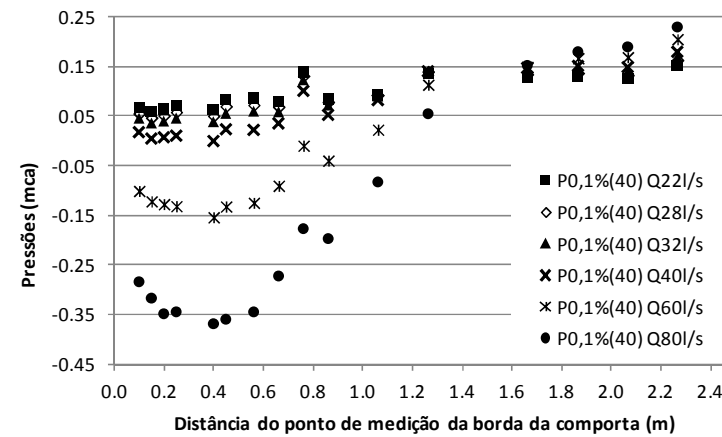


Figura 87 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 40%.

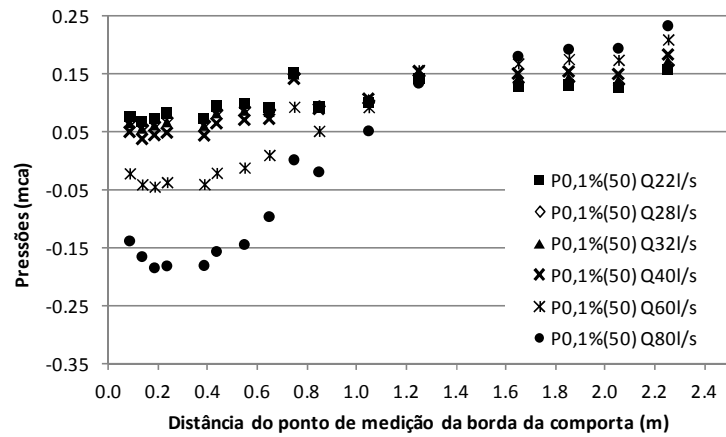


Figura 88 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 50%.

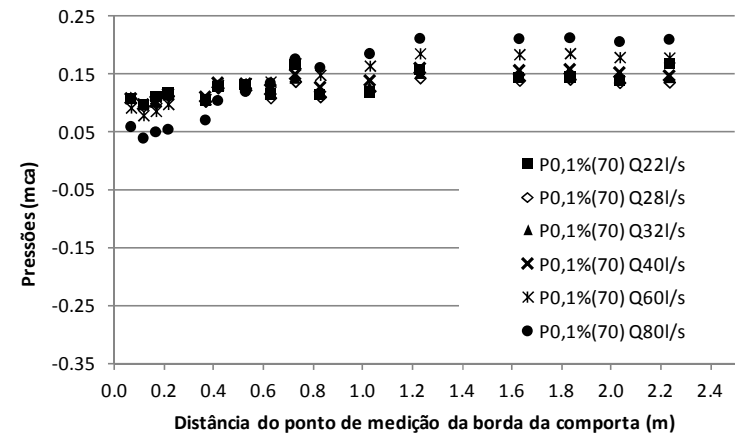


Figura 90 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 70%.

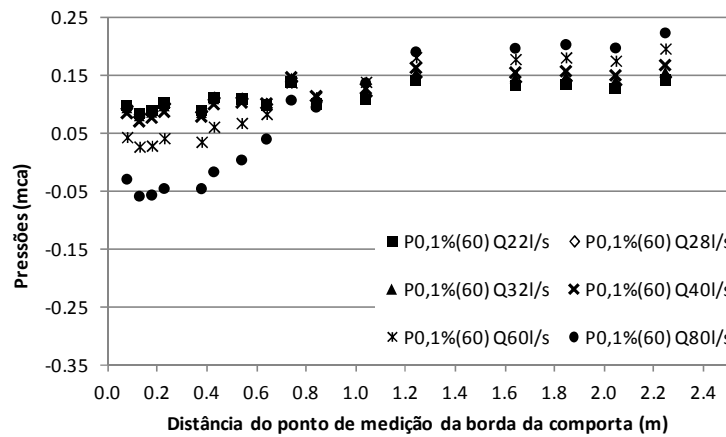


Figura 89 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 60%.

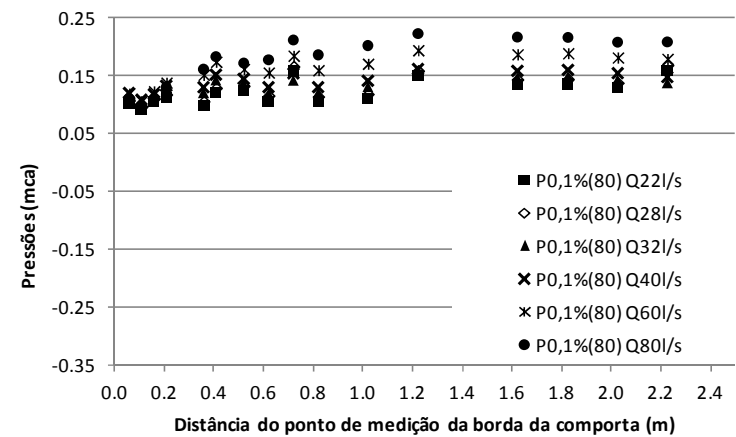


Figura 91 – Comportamento das pressões 0,1%, no teto do conduto, para abertura de 80%.

A partir da análise das figuras percebe-se que:

- a) as pressões  $P_{0,1\%}$  ocorrem logo à jusante da comporta e se estendem ao longo de uma certa distância para depois aumentarem gradualmente;
- b) a menor pressão  $P_{0,1\%}$  ocorreu para a abertura de 30% com vazão de 80l/s. Destaca-se que no caso de pressões médias o menor valor ocorreu para a abertura de 30% e vazão de 80 l/s, no caso das pressões 1% o menor valor ocorreu, também, para a abertura de 40% e vazão de 80 l/s;
- c) as pressões  $P_{0,1\%}$  crescem à medida que se afastam da comporta e tendem a se estabilizar por volta de 0,2 mca a uma distância de 6,4 D da borda da comporta;
- d) 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;
- e) 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.

## 5.5 Verificação e análise dos dimensionais $CP_{1\%}$ , $CP_{0,1\%}$ e $L_{adm}$

Para o conhecimento das pressões mínimas foi aplicada a mesma metodologia utilizada para as pressões médias. No entanto, os CP's, neste caso, passaram a utilizar a pressão média, ou seja, da pressão  $P_{x\%}$  é subtraída a pressão média no ponto de medição igualada para determinado grau de abertura da comporta. As equações 11 e 12 apresentam como foi realizado o cálculo do  $CP_{1\%}$  e do  $CP_{0,1\%}$ , respectivamente.

$$CP_{1\%} = \frac{P_{1\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Equação 11}$$

$$CP_{0,1\%} = \frac{P_{0,1\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Equação 12}$$

### 5.5.1 Verificação e análise para as pressões $P_{1\%}$ na base da galeria

Por meio dos gráficos compreendidos entre a Figura 92 e a Figura 99 apresentam-se as comparações entre as curvas ajustadas pelos dados obtidos com a presente pesquisa e as curvas propostas por Battiston, (2013).

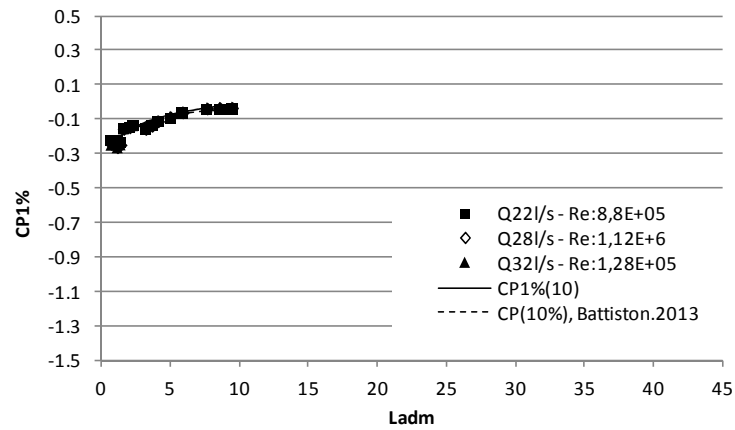


Figura 92 – CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 10% da comporta.

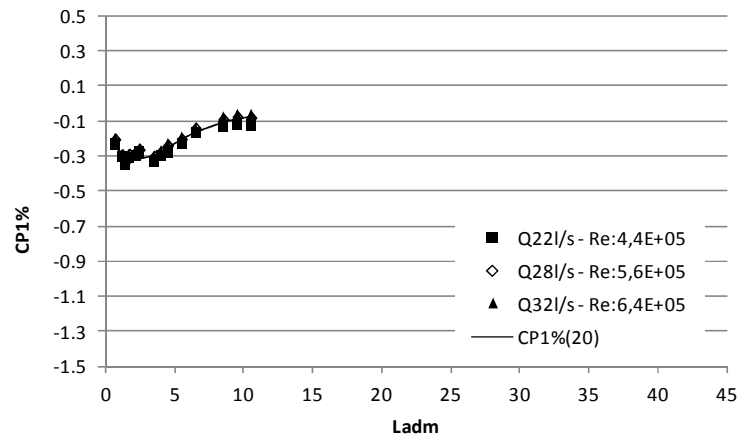


Figura 93 – CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 20% da comporta.

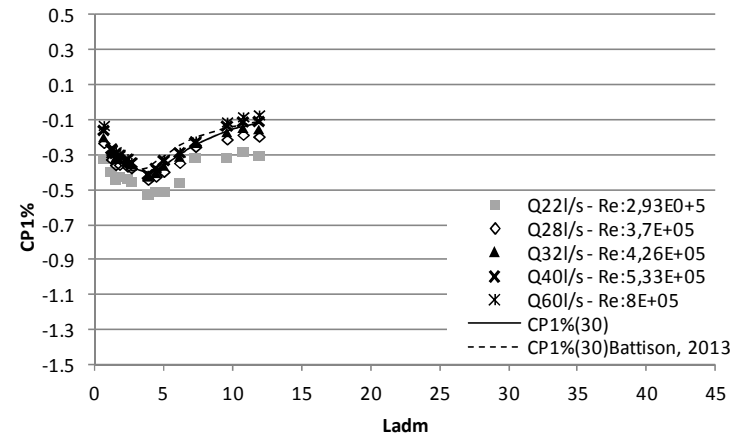


Figura 94– CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 30% da comporta.

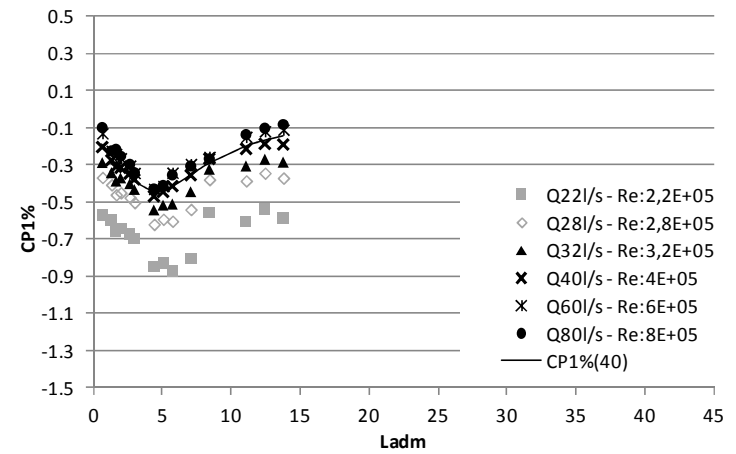


Figura 95– CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 40% da comporta.

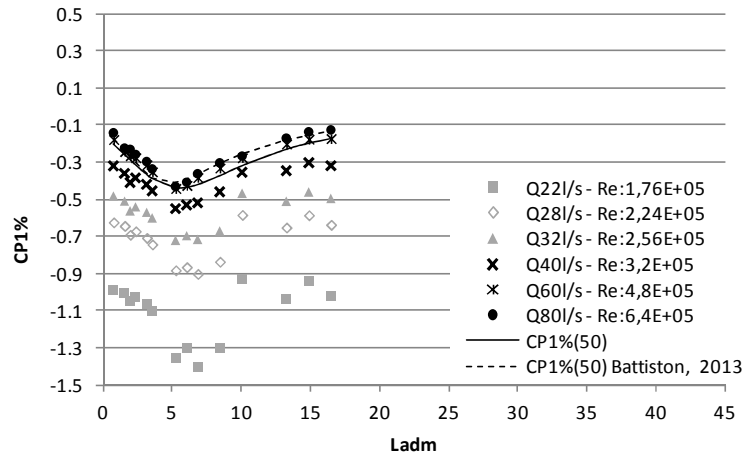


Figura 96- CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 50% da comporta.

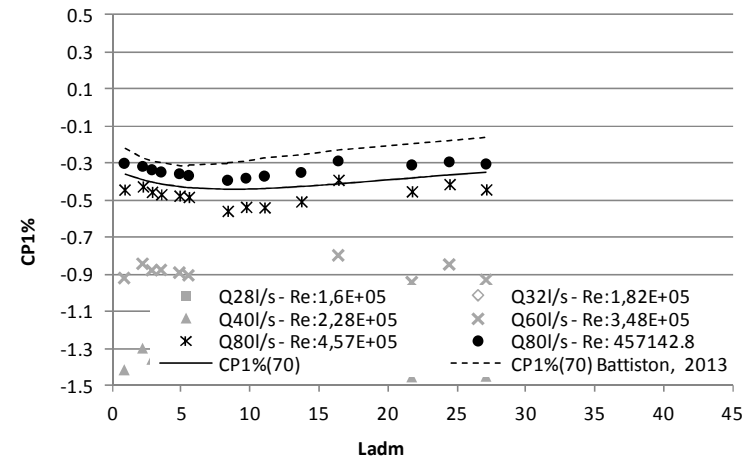


Figura 98- CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 70% da comporta.

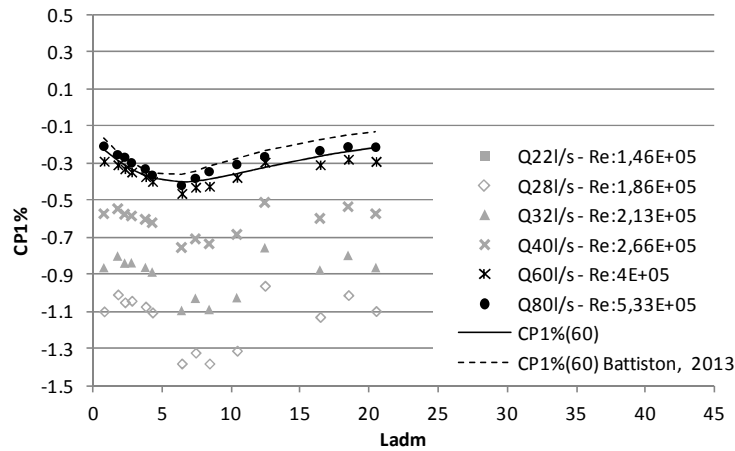


Figura 97- CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 60% da comporta.

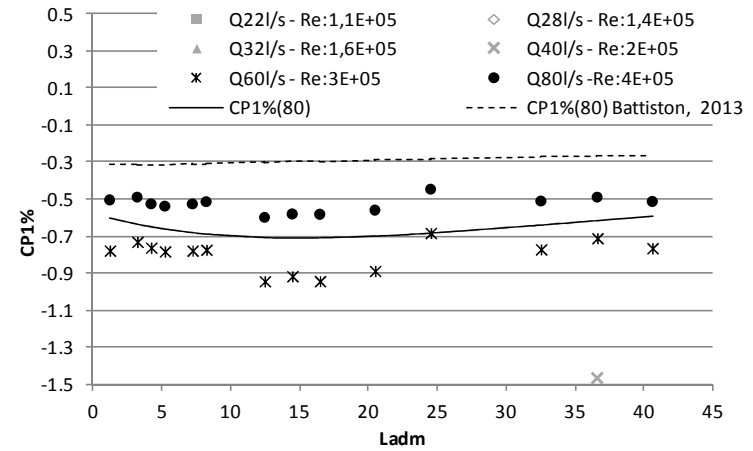


Figura 99- CP<sub>1%</sub> na base para abertura de 80% da comporta.

Após a observação dos gráficos apresentados pelas figuras percebe-se que:

- a) os dados provenientes de ensaios com Reynolds inferior a  $3 \times 10^5$  diferem da tendência geral, como salientado por Battiston, (2013);
- b) os valores de  $CP_{1\%}$  tem menor amplitude para as pequenas porcentagens de abertura, 10% a 30%;
- c) o menor valor obtido para CP foi -1,0 na posição adimensional em torno de 15 na abertura de 80% e vazão de 60 l/s;
- d) os valores de CP crescem até a posição adimensional 8, a partir dessa posição os valores se estabilizam em torno de  $CP = -0,1$ ;
- e) as curvas obtidas com esta pesquisa apresentam boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston (2013), no entanto, para as porcentagens de abertura 70% e 80% as discrepâncias foram maiores devido as menores vazões ensaiadas no presente estudo;
- f) utilizando vazões menores, no caso da presente pesquisa, e porcentagens de aberturas extras, 20% e 40%, os resultados não apresentaram discrepâncias.

Na Figura 100 são apresentadas as curvas para todas as aberturas no caso da base da galeria para  $CP_{1\%}$ .

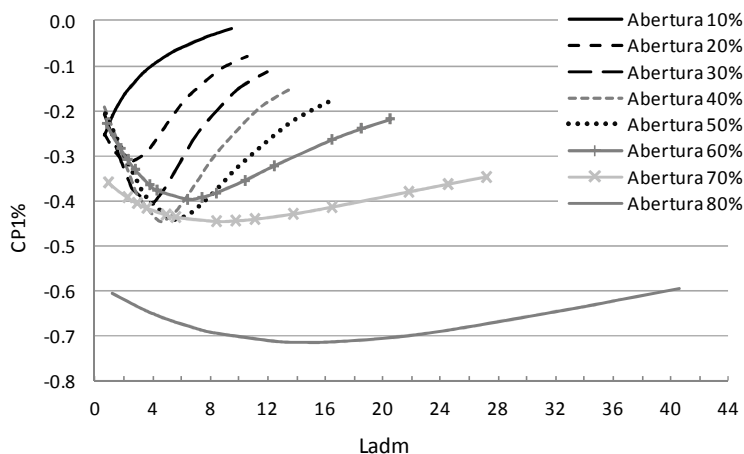


Figura 100 – Curvas finais para  $CP_{1\%}$  para diferentes porcentagens de abertura na base do conduto

As curvas ajustadas são representadas pela função racional descrita pela equação 13 e os coeficientes estão apresentados no Quadro 10.

$$CP_{1\%} = \frac{a + b \cdot L_{adm}}{1 + c \cdot L_{adm} + d \cdot L_{adm}^2}$$

Equação 13

Abert.	Coeficientes				R <sup>2</sup>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
10%	-0,3220	0,0256	0,3004	-0,0099	0,95
20%	-0,2097	-0,0160	-0,2165	0,05412	0,94
30%	-0,1569	-0,0292	-0,2631	0,04601	0,94
40%	-0,1418	-0,0343	-0,2210	0,0328	0,85
50%	-0,1613	-0,0349	-0,1507	0,0209	0,78
60%	-0,1825	-0,0553	-0,0319	0,0136	0,85
70%	-0,3307	-0,0591	0,0723	0,0035	0,40
80%	-0,5802	-0,0342	0,0226	0,0008	0,25

Quadro 10 – Coeficiente para a equação 13 para obtenção do valor de CP<sub>1%</sub> para a base da galeria.

### 5.5.2 Verificação e análise para as pressões P<sub>1%</sub> no teto da galeria

Por meio dos gráficos compreendidos entre a Figura 101 e a Figura 108 apresentam-se as comparações entre as curvas ajustadas pelos dados obtidos com a presente pesquisa e as curvas propostas por Battiston, (2013).



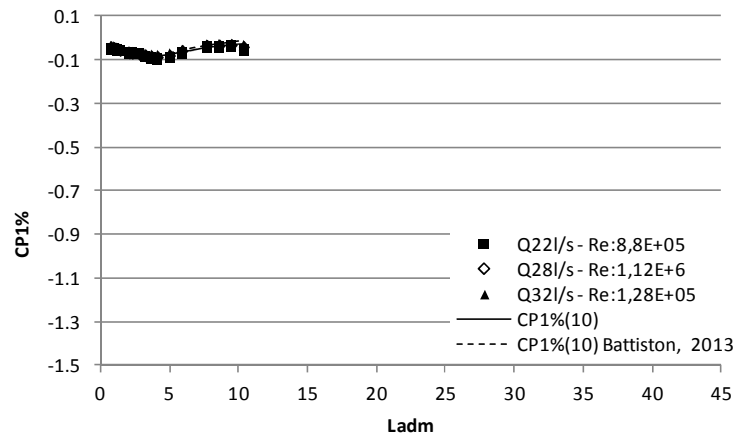


Figura 101– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 10% da comporta.

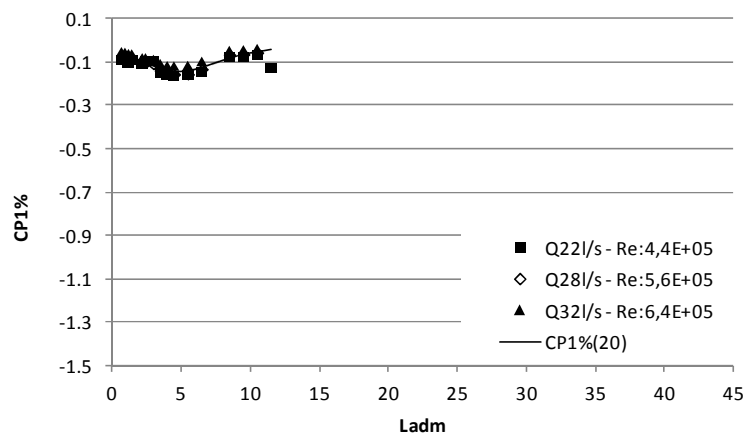


Figura 102– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 20% da comporta.

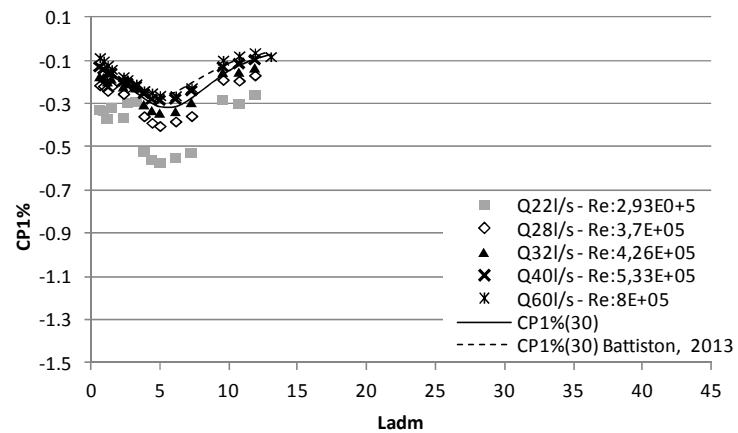


Figura 103– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 30% da comporta.

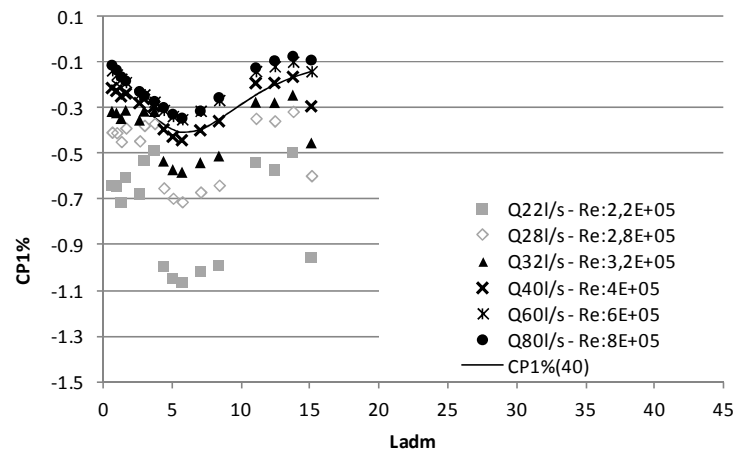


Figura 104– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 40% da comporta.

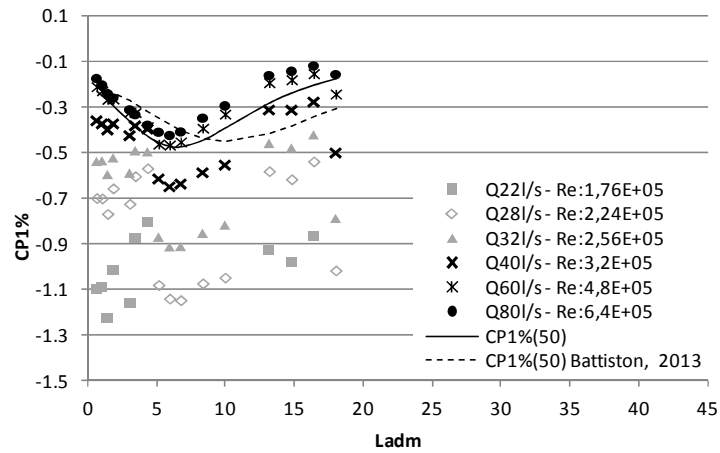


Figura 105– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 50% da comporta.

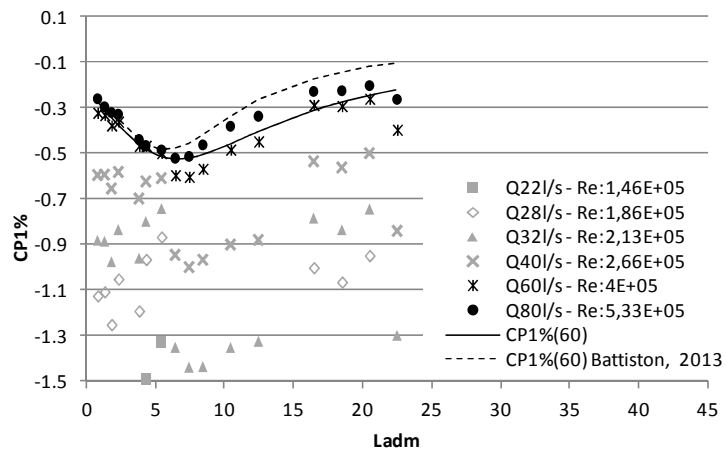


Figura 106– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 60% da comporta.

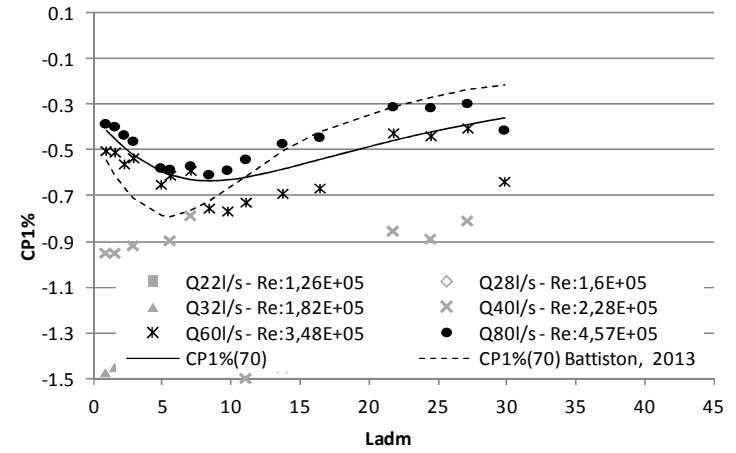


Figura 107– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 70% da comporta.

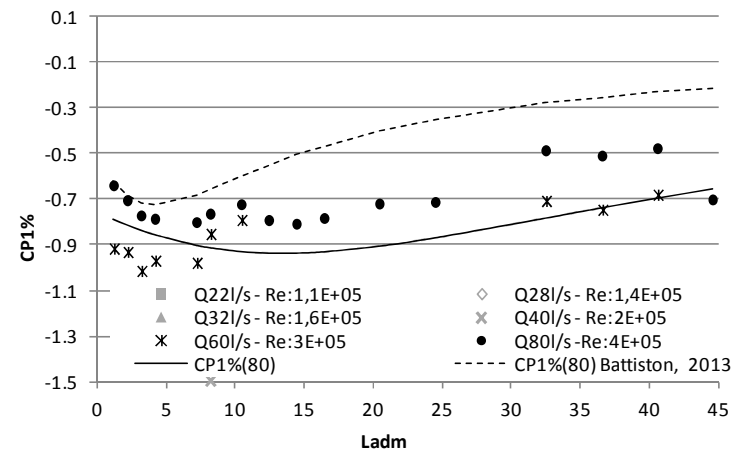


Figura 108– CP<sub>1%</sub>no teto para abertura de 80% da comporta.

Após a observação dos gráficos apresentados pelas figuras percebe-se que:

- os dados provenientes de ensaios com Reynolds inferior a  $3 \times 10^5$  diferem da tendência geral;
- os valores de  $CP_{1\%}$  tem menor amplitude para as pequenas porcentagens de abertura, 10% e 20%;
- o menor valor obtido para CP ocorreu na abertura de 80% e vazão de 60 l/s atingindo um mínimo de -1,3 na posição adimensional 16;
- os valores de CP crescem até se estabilizarem em torno de  $CP = -0,1$ ;
- as curvas obtidas com esta pesquisa apresentam boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston (2013), no entanto, para as porcentagens de abertura 70% e 80% as discrepâncias foram maiores devido as menores vazões ensaiadas no presente estudo;
- utilizando vazões menores, no caso da presente pesquisa, e porcentagens de aberturas extras, 20% e 40%, os resultados não apresentaram discrepâncias.

Na Figura 109 são apresentadas as curvas para todas as aberturas no caso do teto da galeria para  $CP_{1\%}$ .

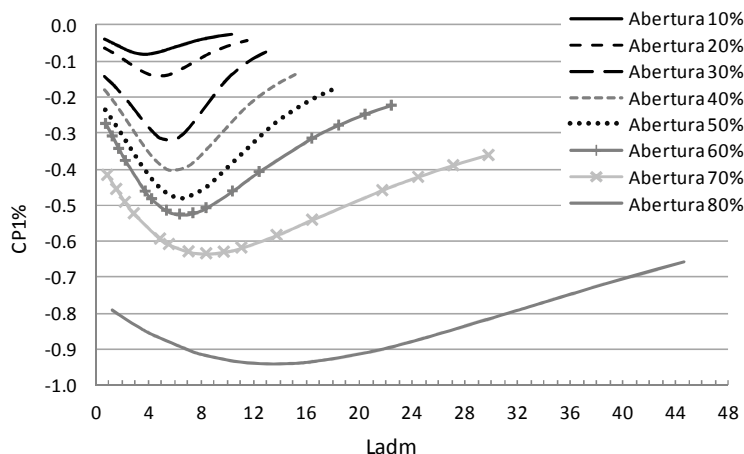


Figura 109 – Curvas finais para  $CP_{1\%}$  para diferentes porcentagens de abertura no teto do conduto.

As curvas ajustadas são representadas pela função racional descrita pela equação 14 e os coeficientes estão apresentados no Quadro 11.

$$CP_{1\%} = \frac{a + b \cdot L_{adm}}{1 + c \cdot L_{adm} + d \cdot L_{adm}^2} \quad \text{Equação 14}$$

Abert.	Coeficientes				R <sup>2</sup>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
10%	-0,0305	-0,0049	-0,2769	0,0446	0,92
20%	-0,0539	-0,0019	-0,2427	0,0264	0,78
30%	-0,1240	0,0015	-0,2235	0,0195	0,85
40%	-0,1541	-0,0098	-0,1823	0,0172	0,67
50%	-0,2009	-0,0174	-0,1421	0,0137	0,71
60%	-0,2214	-0,0481	-0,0842	0,0133	0,89
70%	-0,3582	-0,0685	0,0042	0,0062	0,70
80%	-0,7566	-0,0339	0,0073	0,0011	0,40

Quadro 11 - Coeficiente para a equação 14 para obtenção do valor de CP<sub>1%</sub> para o teto da galeria.

### 5.5.3 Verificação e análise para as pressões $P_{0,1\%}$ na base da galeria

Por meio dos gráficos compreendidos entre a Figura 110 e a Figura 117 apresentam-se as comparações entre as curvas ajustadas pelos dados obtidos com a presente pesquisa e as curvas propostas por Battiston, (2013).

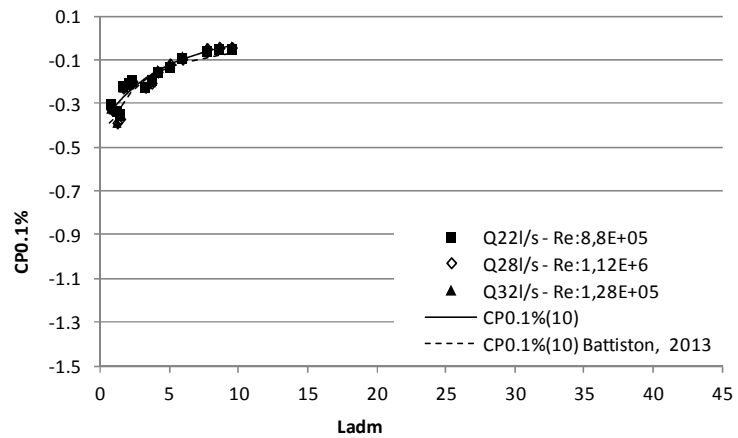


Figura 110–  $CP_{0,1\%}$  na base para abertura de 10% da comporta.

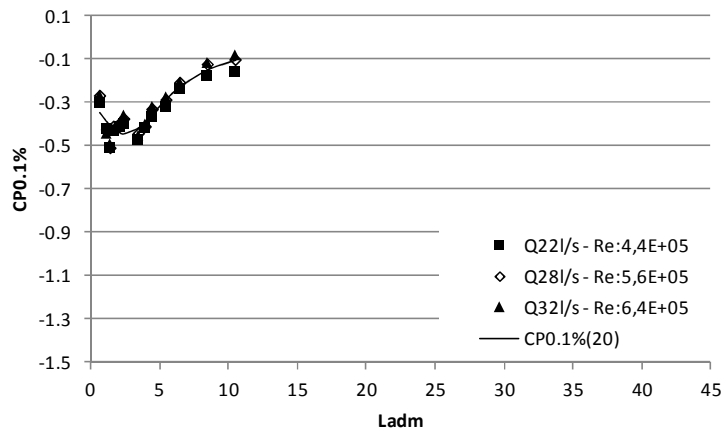


Figura 111–  $CP_{0,1\%}$  na base para abertura de 20% da comporta.

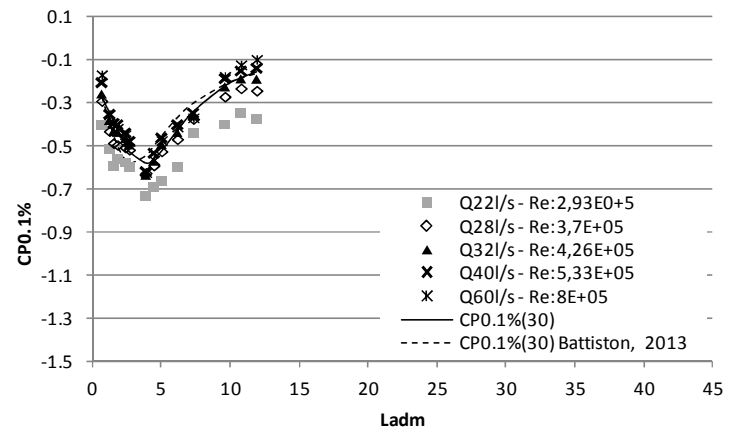


Figura 112–  $CP_{0,1\%}$  na base para abertura de 30% da comporta.

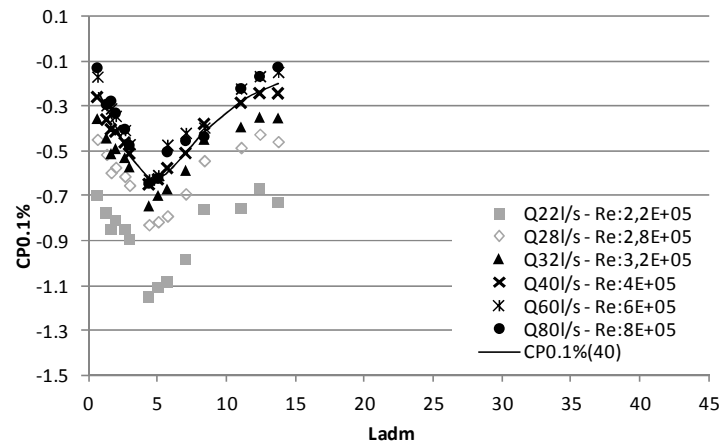


Figura 113–  $CP_{0,1\%}$  na base para abertura de 40% da comporta.

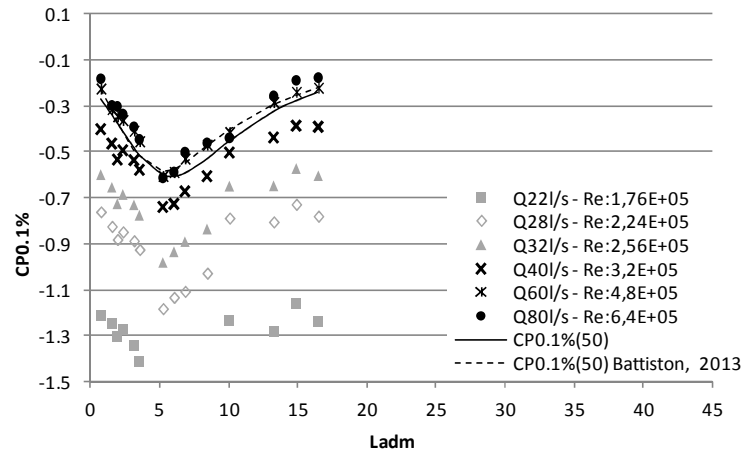


Figura 114– CP<sub>0,1%</sub> na base para abertura de 50% da comporta.

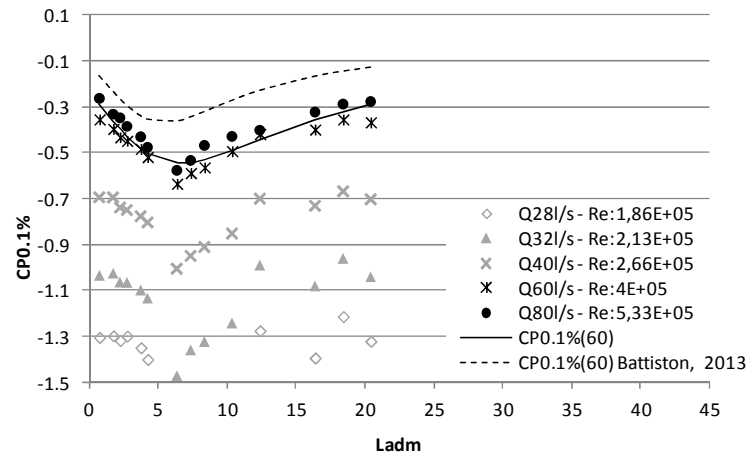


Figura 115– CP<sub>0,1%</sub> na base para abertura de 60% da comporta.

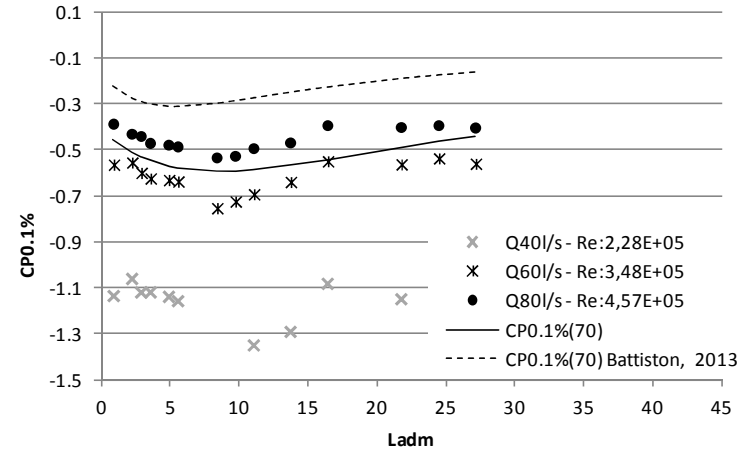


Figura 116– CP<sub>0,1%</sub> na base para abertura de 70% da comporta.

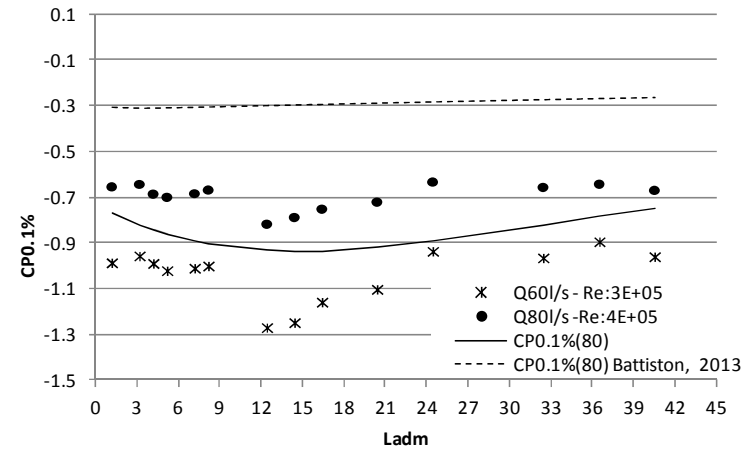


Figura 117– CP<sub>0,1%</sub> na base para abertura de 80% da comporta.

Após a observação dos gráficos apresentados pelas figuras percebe-se que:

- os dados provenientes de ensaios com Reynolds inferior a  $3 \times 10^5$  diferem da tendência geral;
- os valores de  $CP_{0,1\%}$  tem menor amplitude para as pequenas porcentagens de abertura, 10% a 20%;
- o menor valor obtido para CP ocorreu na abertura de 80% e vazão de 60 l/s atingindo um mínimo de -1,3 na posição adimensional 12;
- os valores de CP tendem a se estabilizar em torno de  $CP = -0,1$ ;
- as curvas obtidas com esta pesquisa apresentam boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston (2013), no entanto, para as porcentagens de abertura 60%, 70% e 80% as discrepâncias foram maiores devido as menores vazões ensaiadas no presente estudo;
- as aberturas extras, 20% e 40% podem ser incluídas na metodologia proposta por Battiston (2013).

Na Figura 118 são apresentadas as curvas para todas as aberturas no caso da base da galeria para  $CP_{0,1\%}$ .

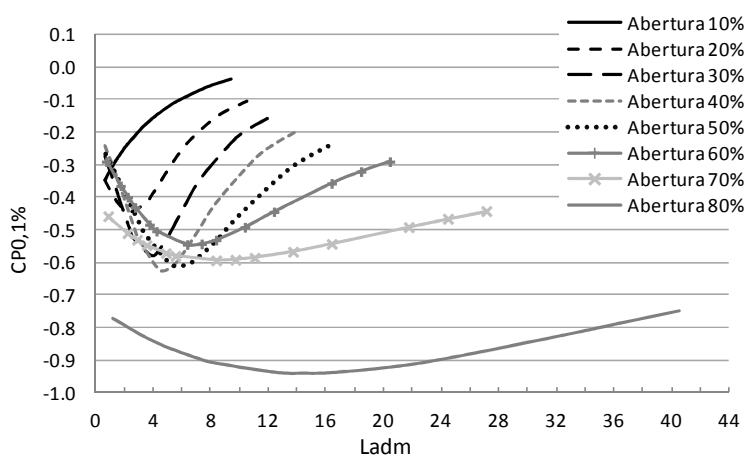


Figura 118 – Curvas finais para  $CP_{0,1\%}$  para diferentes porcentagens de abertura na base do conduto

As curvas ajustadas são representadas pela função racional descrita pela equação 15 e os coeficientes estão apresentados no Quadro 12.

$$CP_{0,1\%} = \frac{a + b \cdot L_{adm}}{1 + c \cdot L_{adm} + d \cdot L_{adm}^2} \quad \text{Equação 15}$$

Abert.	Coeficientes				R <sup>2</sup>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
10%	-0,4166	0,0315	0,1854	0,0067	0,94
20%	-0,2889	-0,0200	-0,2382	0,0561	0,93
30%	-0,2028	-0,0397	-0,2788	0,0464	0,95
40%	-0,1773	-0,0453	-0,2327	0,0325	0,89
50%	-0,2133	-0,0381	-0,1600	0,0191	0,84
60%	-0,2319	-0,0627	-0,0571	0,0129	0,90
70%	0,4129	-0,0810	0,0641	0,0043	0,48
80%	-0,7358	-0,0444	0,0178	0,0010	0,31

Quadro 12 - Coeficiente para a equação 15 para obtenção do valor de  $CP_{0,1\%}$  para a base da galeria

#### 5.5.4 Verificação e análise para as pressões $P_{0,1\%}$ no teto da galeria

Por meio dos gráficos compreendidos entre a Figura 119 e a Figura 126 apresentam-se as comparações entre as curvas ajustadas pelos dados obtidos com a presente pesquisa e as curvas propostas por Battiston, (2013).



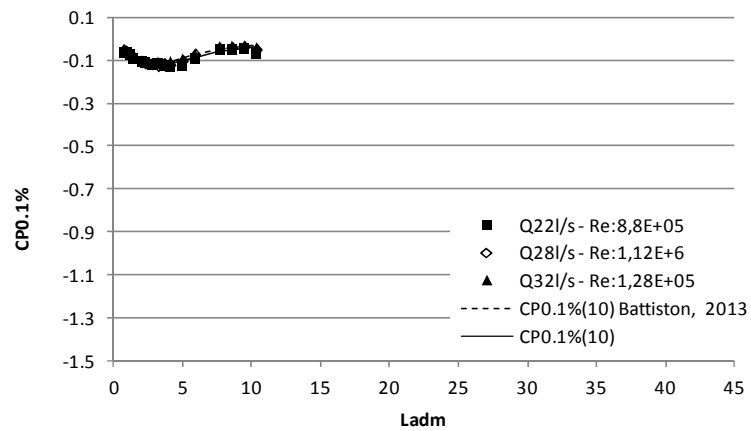


Figura 119 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 10% da comporta.

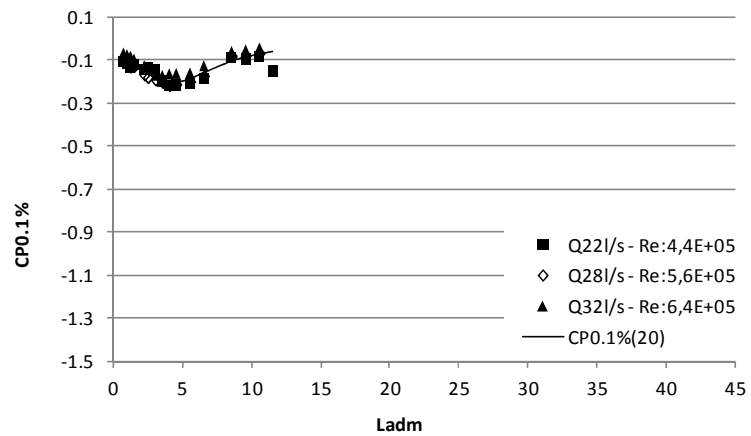


Figura 120 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 20% da comporta.

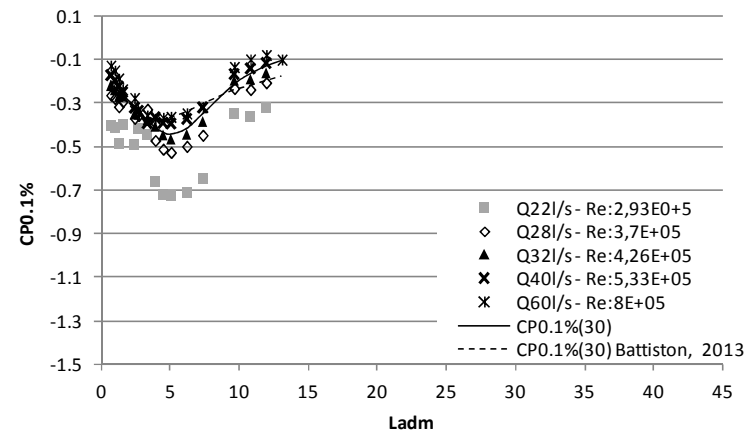


Figura 121 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 30% da comporta.

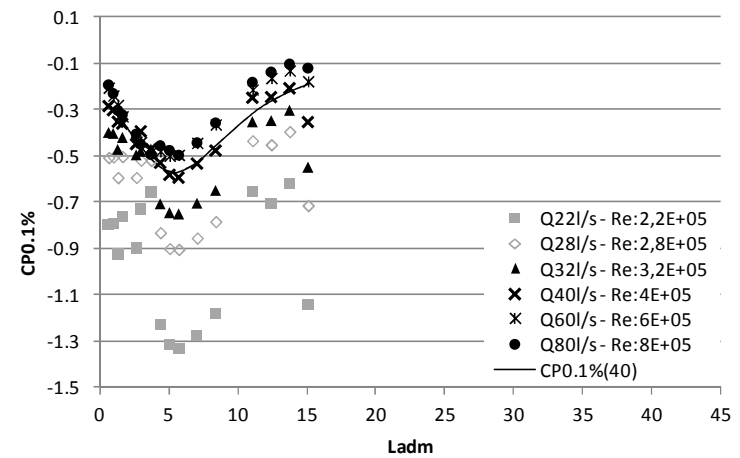


Figura 122 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 40% da comporta.

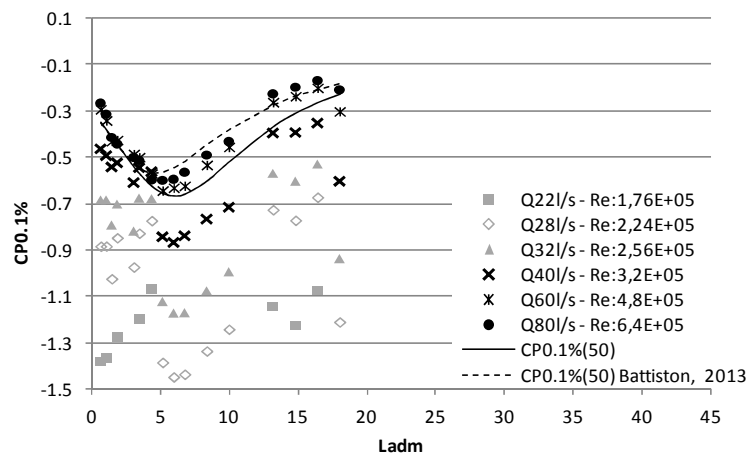


Figura 123 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 50% da comporta.

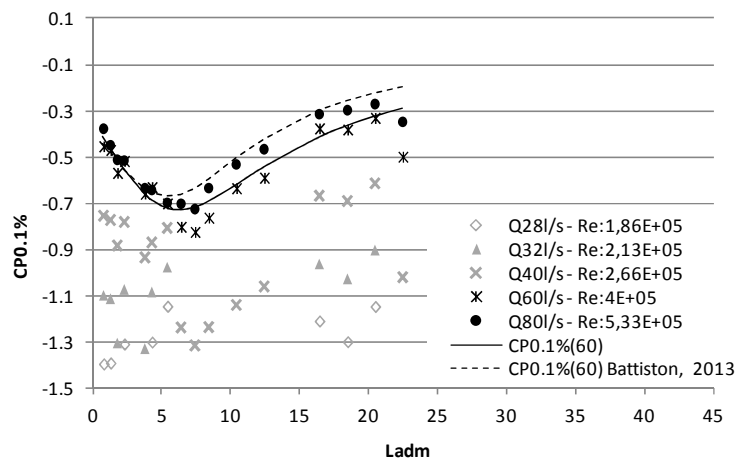


Figura 124 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 60% da comporta.

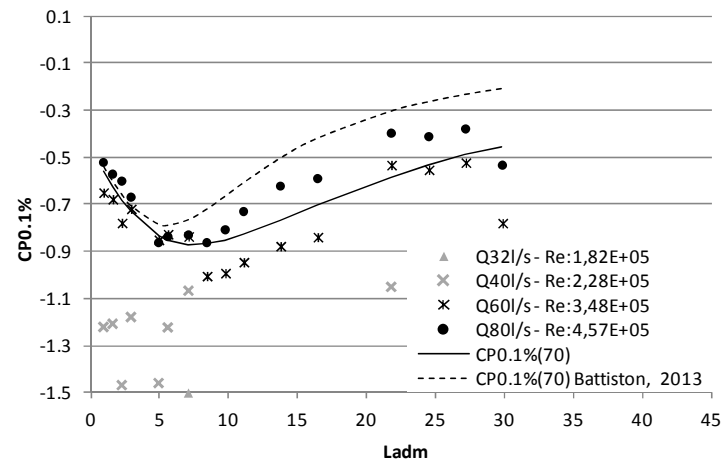


Figura 125 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 70% da comporta.

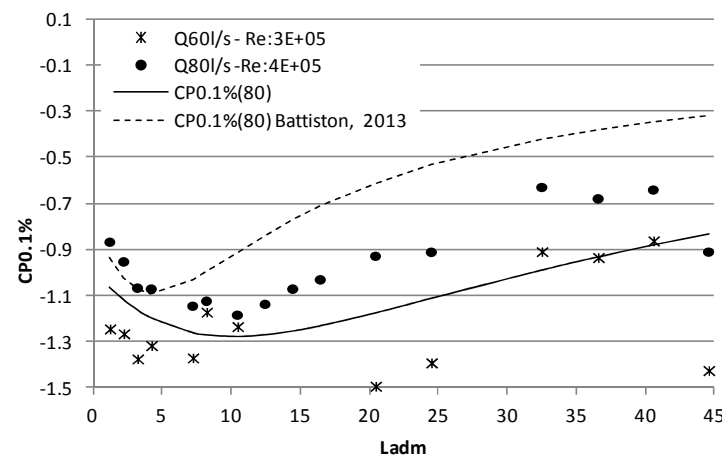


Figura 126 –  $CP_{0,1\%}$  no teto para abertura de 80% da comporta

Após a observação dos gráficos apresentados pelas figuras percebe-se que:

- os dados provenientes de ensaios com Reynolds inferior a  $3 \times 10^5$  diferem da tendência geral;
- os valores de  $CP_{0,1\%}$  tem menor amplitude para as pequenas porcentagens de abertura, 10% e 20%;
- o menor valor obtido para CP ocorreu na abertura de 80% e vazão de 60 l/s atingindo um mínimo de -1,5 na posição adimensional 20;
- os valores de  $CP_{0,1\%}$  tendem a se estabilizar em torno de  $CP_{0,1\%} = -0,1$ ;
- as curvas obtidas com esta pesquisa apresentam boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston (2013), no entanto, para as porcentagens de abertura 70% e 80% as discrepâncias foram maiores devido as menores vazões ensaiadas no presente estudo;
- as aberturas extras, 20% e 40% podem ser incluídas na metodologia proposta por Battiston (2013).

Na Figura 127 são apresentadas as curvas para todas as aberturas no caso do teto da galeria para  $CP_{0,1\%}$ .

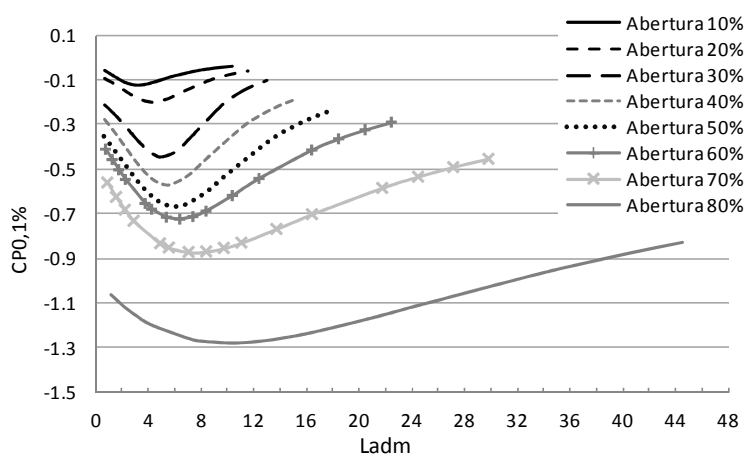


Figura 127 – Curvas finais para  $CP_{0,1\%}$  para diferentes porcentagens de abertura no teto do conduto

As curvas ajustadas são representadas pela função racional descrita pela equação 16 e os coeficientes estão apresentados no Quadro 13.

$$CP_{0,1\%} = \frac{a + b \cdot L_{adm}}{1 + c \cdot L_{adm} + d \cdot L_{adm}^2} \quad \text{Equação 16}$$

Abert.	Coeficientes				R <sup>2</sup>
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
10%	-0,0356	-0,0157	-0,3226	0,0698	0,95
20%	-0,0746	-0,0064	-0,2612	0,0339	0,87
30%	-0,1823	-0,0012	-0,2288	0,0227	0,91
40%	-0,2317	-0,0193	-0,1846	0,0202	0,79
50%	-0,3004	-0,0252	-0,1430	0,0149	0,79
60%	-0,3415	-0,0613	-0,0843	0,0135	0,91
70%	-0,4642	-0,1157	0,0078	0,0083	0,79
80%	-0,9844	-0,1157	0,0457	0,0022	0,53

Quadro 13 - Coeficiente para a equação 16 para obtenção do valor de CP<sub>0,1%</sub> para a base da galeria

## 5.6 Comportamento e análise dos adimensionais CP para pressões na abertura de 100% da comporta.

Para a utilização da metodologia apresentada é necessário o conhecimento das pressões quando da abertura completa da comporta. Sendo assim este item vem apresentar o comportamento das pressões médias,  $P_{1\%}$  e  $P_{0,1\%}$ , bem como a apresentação do CP, equação 17, e o intervalo de utilização dos resultados apresentados por esta pesquisa nesta condição.

$$CP_{100\%}^* = \frac{P}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Equação 17}$$

Nos gráficos compreendidos entre a Figura 128 e a Figura 133 pode ser visto o comportamento das pressões médias, pressões 1% e pressões 0,1% para a abertura de 100%.

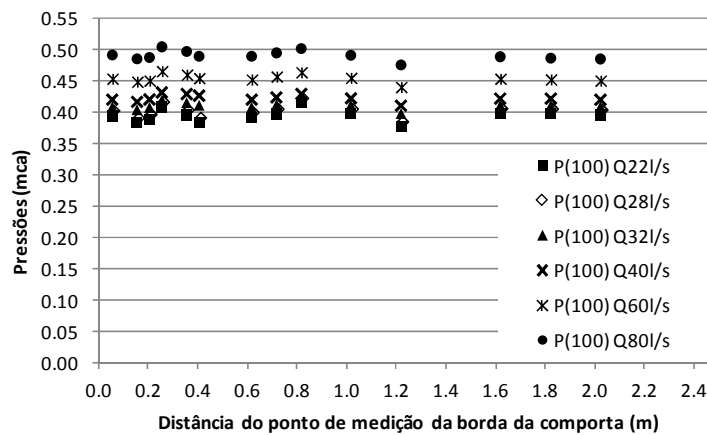


Figura 128 – Comportamento das pressões médias, na base da galeria.

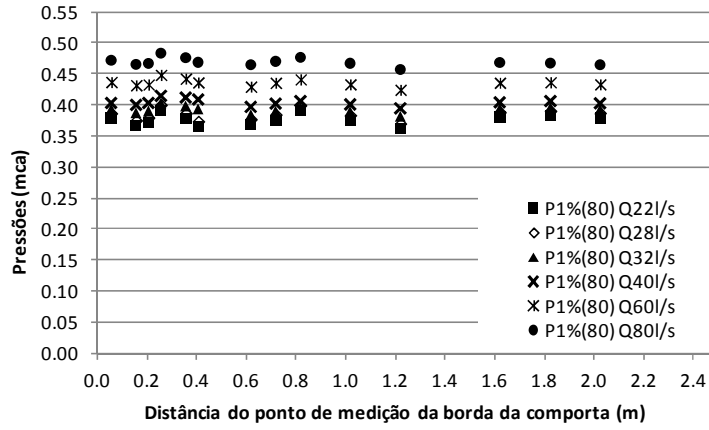


Figura 129 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$ , na base da galeria.

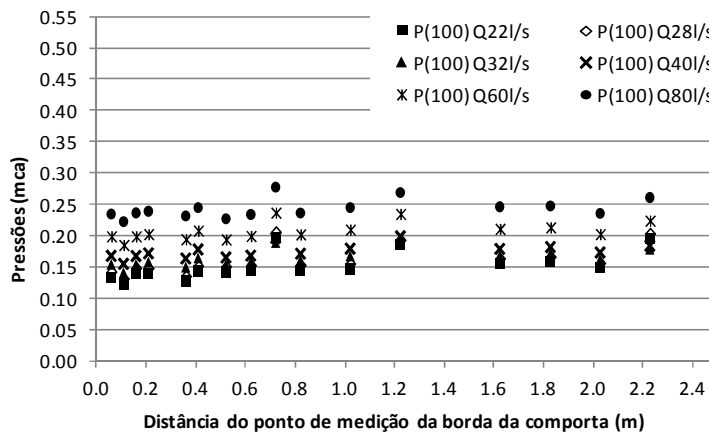


Figura 130 – Comportamento das pressões médias, no teto da galeria.

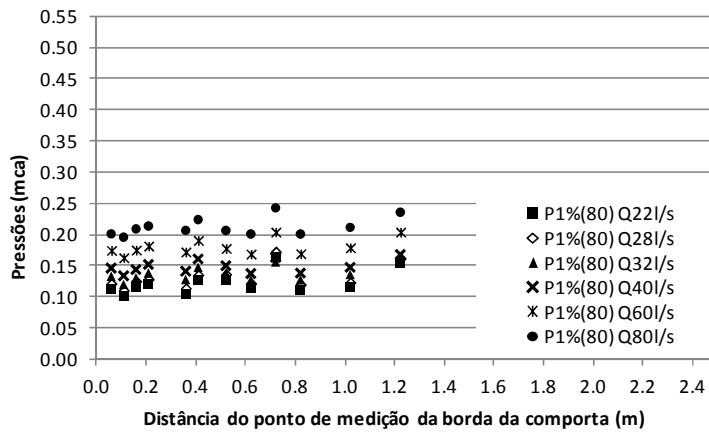


Figura 131 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$ , no teto da galeria.

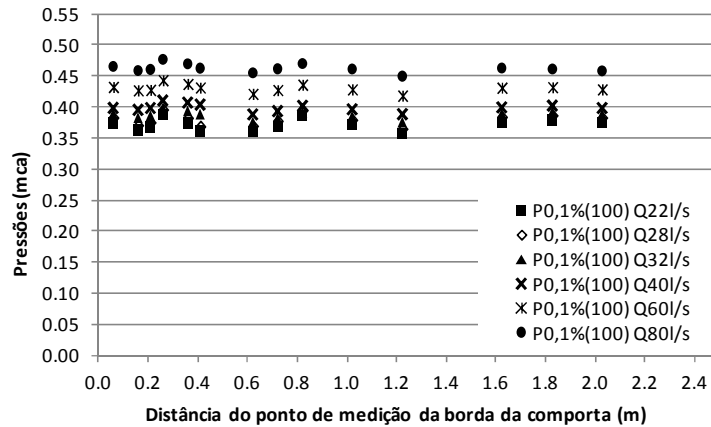


Figura 132 – Comportamento das pressões  $P_{0,1\%}$ , na base da galeria.

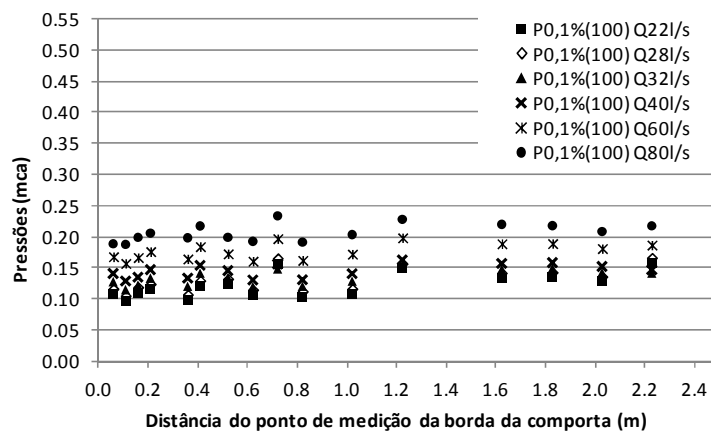


Figura 133 – Comportamento das pressões  $P_{0,1\%}$ , no teto da galeria.

É possível perceber através das figuras que:

- o comportamento das pressões na base apresenta a mesma tendência independente de sua condição, média, 1% ou 0,1%;
- percebe-se, também, que as pressões  $P_{1\%}$  e  $P_{0,1\%}$  são ligeiramente menores que as pressões médias;
- no caso das pressões no teto, verifica-se que as pressões são menores que as registradas para a base e seguem a mesma tendência das pressões da base;
- no caso da abertura de 100%, as pressões aumentam à medida que a vazão aumenta, tanto na base como no teto da galeria.

Na Figura 134 e na Figura 135 podem ser conferidos os valores de  $CP_{100\%}^*$ , calculado pela equação 17 para a base e para o teto, respectivamente. Nos gráficos os valores de CP são apresentados em função de um adimensional denominado de  $\theta$  representado pela

equação 18. Nas mesmas imagens podem ser conferidas as curvas de ajuste para cada situação, bem como o R<sup>2</sup>.

$$\theta = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot d^3} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

Q é a vazão do escoamento;

b é a dimensão respectiva à base da galeria;

d é a dimensão respectiva à altura da galeria.

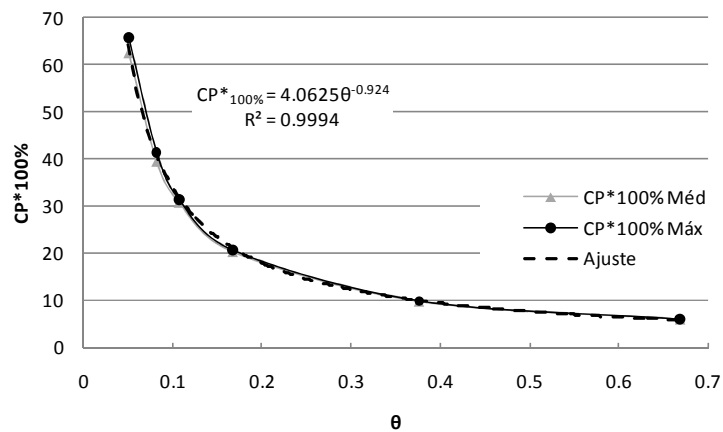


Figura 134 – CP\*100% para a base da galeria.

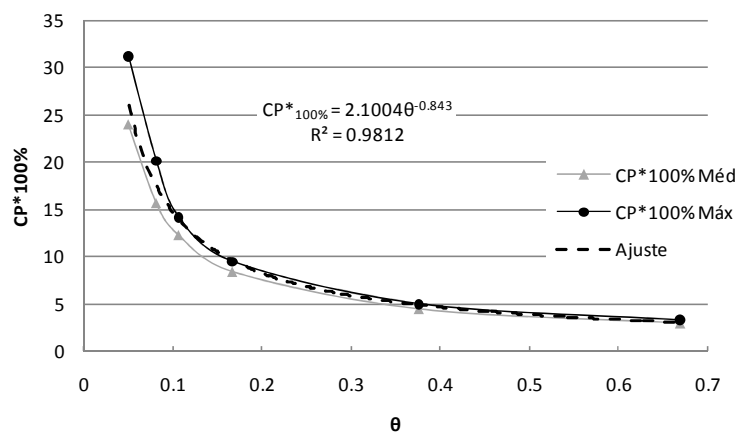


Figura 135 – CP\*100% para o teto da galeria.



Nas figuras são mostradas duas curvas, a curva denominada de  $CP^*_{100\%Méd}$  foi calculada a partir da utilização da pressão média, já a curva denominada de  $CP^*_{100\%Máx}$  foi calculada a partir da maior pressão registrada na dada condição.

Nas figuras: Figura 136, Figura 137, Figura 138 e Figura 139 podem ser identificados os valores de  $CP^*_{1\%}$  e  $CP^*_{0,1\%}$ . O cálculo destes adimensionais foi realizado por meio da equação 17, no entanto a pressão P, utilizada foi a pressão  $P_{1\%}$  no caso do  $CP^*_{1\%}$  e pressão  $P_{0,1\%}$  no caso do  $CP^*_{0,1\%}$ .

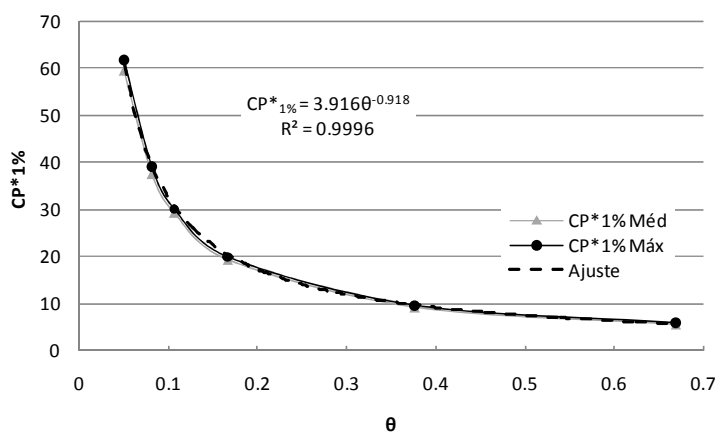


Figura 136 –  $CP^*_{1\%}$  para a base da galeria.

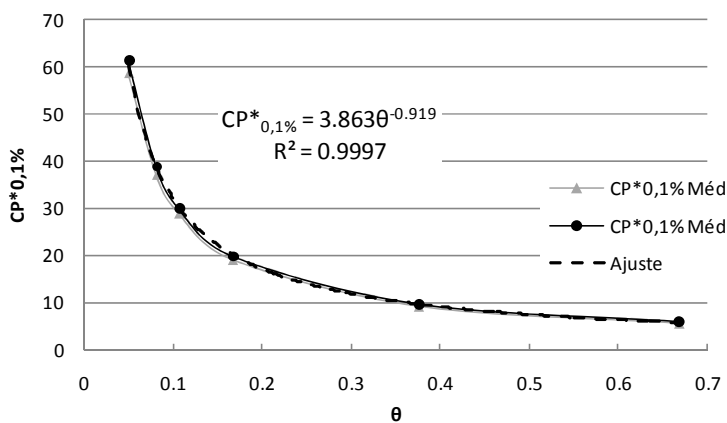


Figura 137 –  $CP^*_{0,1\%}$  para a base da galeria.

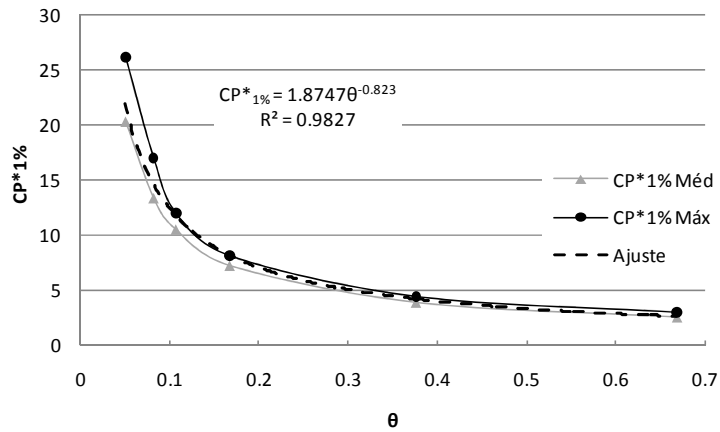


Figura 138 – CP\*<sub>1%</sub> para o teto da galeria.

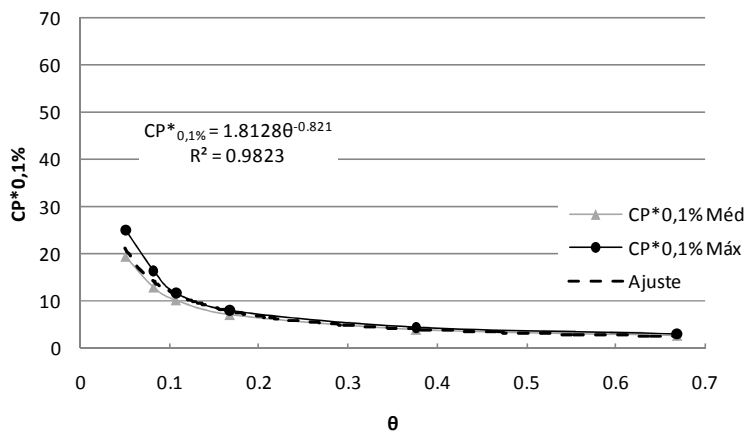


Figura 139 – CP\*<sub>0,1%</sub> para o teto da galeria.

A partir dos gráficos apresentados anteriormente é possível identificar o valor do adimensional desejado para posterior cálculo da pressão na ocasião da comporta completamente aberta.

Destaca-se que todos os resultados apresentados na presente pesquisa são válidos para  $2,81 \leq CP^*_{100\%} \leq 65,9$ .

## 6 CONCLUSÕES

Por fim, no que tange ao desenvolvimento socioeconômico do país, fica claro o quão importante uma eclusa pode ser. As eclusas permitem que barragens de usinas hidrelétricas, e outras, não sejam impedimentos para a navegação de rios, permitindo assim que o modal hidroviário cresça em paralelo ao setor energético.

Com esta pesquisa buscou-se expandir os conhecimentos acerca da dinâmica do escoamento a jusante de comporta segmento invertida, além de proporcionar mais uma referência para pesquisas e melhoramentos futuros, visto que os investimentos para a construção de eclusas e desenvolvimento da navegação são bastante expressivos.

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados através do desenvolvimento desta pesquisa. Enfatiza-se que os resultados apresentados nesta pesquisa destinam-se a escoamentos que apresentam a variação do  $CP_{100\%}^*$  entre 2,8 e 65,9.

### 6.1 Verificação da metodologia proposta por Battiston (2013).

A reprodução dos ensaios realizados por Battiston (2013) permitiu averiguar que os resultados da autora puderam ser repetidos e expandidos para as aberturas 20% e 40%, não simuladas pela autora, seguindo a mesma tendência das demais aberturas.

### 6.2 Comportamento das pressões.

A partir dos dados experimentais foi possível concluir que, no que tange ao comportamento das pressões:

- as pressões mínimas ocorrem logo à jusante da comporta e se estendem ao longo de uma certa distância, que depende da vazão e da porcentagem de abertura da comporta, para depois aumentarem.
- As pressões começam a aumentar a partir da distância de 3,5D da borda da comporta, no caso da base da galeria e, a partir de 2,4D no caso do teto da galeria.
- À medida que a abertura da comporta aumenta para uma mesma vazão, as pressões aumentam, indicando que para maiores aberturas maiores serão as pressões.
- 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.
- As menores pressões podem ser conferidas no Quadro 14:

Pressão	Abertura	Valor (mca)	Distância da borda da comporta (cm)	Vazão (l/s)
Base da galeria				
$\bar{P}$	40%	0,08	30	80
$P_{1\%}$	10%	-0,20	30	32
$P_{0,1\%}$	10%	-0,35	30	32
Teto da Galeria				
$\bar{P}$	30%	-0,42	30	80
$P_{1\%}$	40%	-0,29	30	80
$P_{0,1\%}$	40%	-0,40	40	80

Quadro 14 – Menores pressões registradas em modelo na presente pesquisa.

- Para porcentagens de abertura superior 50% as pressões não atingem mais valores negativos na base da galeria.
- Para porcentagens de abertura superior 70% as pressões não atingem mais valores negativos no teto da galeria.

### 6.3 Resultados acerca dos adimensionais de pressão.

Quanto ao comportamento dos CP's é possível identificar que os dados provenientes de ensaios com Reynolds inferior a  $3 \times 10^5$  diferem da tendência geral, como salientado por Battiston (2013). Além disso, é possível concluir que:

- os adimensionais de pressão têm menores variações, amplitudes, para as porcentagens de abertura de 10% a 20%.
- As porcentagens de abertura, 20% e 40%, não abordadas por Battiston, (2013) podem ser representadas pela metodologia dos adimensionais de pressão proposta.
- Os valores de CP decrescem para depois se estabilizar em um valor que depende da sua condição de CP médio,  $CP_{1\%}$  ou  $CP_{0,1\%}$ .
- O menor valor obtido para CP, na base da galeria, foi -1,2 na posição adimensional em torno de 2,5 na abertura de 50%, no entanto, a menor pressão ocorreu para a abertura de 40%. Tal fato indica que a análise somente do coeficiente CP não é suficiente para indicar para que abertura e vazão ocorre a pressão média mínima. Palauro (2012) enfatiza que as menores pressões, para seus ensaios em regime permanente, ocorreram para abertura de 30%. No caso de ensaios em regime transitório Palauro (2012) comenta que a menor pressão ocorre para 40%. Contudo, Battiston (2013) explana que a ocorrência mais crítica, menor CP, está na abertura, de 60%. Sendo

assim, pode-se concluir que a fase crítica de abertura situa-se entre 30% e 60%.

- No caso do teto da galeria, Palauro (2012) indica que o menor valor de pressão, para seus ensaios, ocorreu, também, para a porcentagem de 30% de abertura.
- Os menores valores de CP podem ser conferidos no Quadro 15:

Adimensional de Pressão	Abertura	Valor	Reynolds
Base da galeria			
$C\bar{P}$	50%	-1,3	$3,2 \cdot 10^5$
CP1%	80%	-1,0	$3,0 \cdot 10^5$
CP0,1%	80%	-1,5	$3,0 \cdot 10^5$
Teto da Galeria			
$C\bar{P}$	80%	-1,8	$4,0 \cdot 10^5$
CP1%	80%	-1,3	$3,0 \cdot 10^5$
CP0,1%	80%	-1,6	$3,0 \cdot 10^5$

Quadro 15 – Valores mínimo dos adimensionais de pressão para a base e o teto da galeria.

- As maiores discrepâncias, entre as curvas obtidas na presente pesquisa e as curvas propostas por Battiston (2013), aconteceram para as aberturas de 70% e 80%. Essas maiores diferenças podem ser explicadas pela maior gama de vazões ensaiadas pela autora.

#### 6.4 Comportamento e análise dos adimensionais CP para pressões na abertura de 100% da comporta.

Quanto ao comportamento das pressões, quando da completa abertura da comporta, pode-se afirmar que à medida que a vazão aumenta as pressões também aumentam. É possível estabelecer uma média, das pressões, única para cada vazão experimentada. As pressões na base do conduto são maiores que as registradas no teto devido à pressão hidrostática.

As pressões nesta condição podem ser representadas por um adimensional de pressão, tradicional, em função de um parâmetro adimensional  $\theta$ , que relaciona a vazão aduzida com a geometria do conduto. A partir desta relação é possível utilizar a metodologia proposta por Battiston (2013), pois permite identificar o valor da pressão  $P_{100\%}$  quando o mesmo não é conhecido.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa em momento algum visou esgotar as possibilidades de estudo acerca deste contexto. Portanto, inúmeras recomendações podem ser sugeridas para futuros estudos, a destacar:

- realização de ensaios com vazões maiores;
- diferentes níveis de montante e jusante;
- avaliar a flutuação das pressões;
- investigação em modelos físicos reduzidos, de novas geometrias de conduto visando a diminuição da amplitude das pressões máximas e mínimas, além de aumentar as pressões mínimas e diminuir a velocidade do escoamento que leva a erosão do contorno sólido,
- ajustar a metodologia proposta para demais geometrias do conduto de adução,

No que tange a utilização dos CP's sugere-se cautela quando da sua utilização, pois os menores valores de CP nem sempre indicam a condição de menor pressão. Tal fato indica que a análise somente do coeficiente CP não é suficiente para indicar para qual abertura e vazão pode ocorrer a menor pressão. A metodologia aqui proposta propõe uma estimativa da distribuição longitudinal das pressões para um resultado mais decisivo é importante a utilização de um modelo físico específico para utilização de resultados concretos no dimensionamento e execução do projeto.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ed. Brasília, 2008.

BATTISTON, C.C. **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, 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Eletrobrás. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Cap. 3. p. 47. 2003. Disponível em: <[http://www.google.com.br/#sclient=psy-ab&hl=pt-BR&source=hp&q=crit%C3%A9rios%20de%20projeto%20civil%20de%20usinas%20hidrel%C3%A9tricas&pbx=1&oq=&aq=&aqi=&aql=&gs\\_sm=&gs\\_upl=&bav=on.2,or\\_r\\_gc.r\\_pw.,cf.osb&fp=98f685d8fe7779a0&biw=1280&bih=685&pf=p&pdl=500](http://www.google.com.br/#sclient=psy-ab&hl=pt-BR&source=hp&q=crit%C3%A9rios%20de%20projeto%20civil%20de%20usinas%20hidrel%C3%A9tricas&pbx=1&oq=&aq=&aqi=&aql=&gs_sm=&gs_upl=&bav=on.2,or_r_gc.r_pw.,cf.osb&fp=98f685d8fe7779a0&biw=1280&bih=685&pf=p&pdl=500)>. Acesso em 6 out. 2011.

BRAZ, A. **Eclusas, o fim de uma longa espera**. Marabá, 2010. Disponível em:<<http://quaradouro.blogspot.com.br/2010/11/eclusas-o-fim-de-uma-longa-espera.html>>. Acesso em: 30 abr. 2011.

CIGANA, C. **Transporte Hidroviário à Deriva no Estado**. Jornal Zero Hora, 31 de março de 2013.

COELHO, W. R. **Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga**. 2006. 234 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Julho de Mesquita Filho, Ilha Solteira.

DALLA CORTE, M. **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**. 2012. Disponível em:<<http://www.demuth.com.br/produtos/index.php?prod=38>>. Acesso em: 29 dezembro 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.

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, 2012.

GIKAS, I. Critérios de semelhança para estudos de cavitação em modelos. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 181-235, 1982.

GONTIJO, N. T.; CAMPOS, R.G.D. **Estruturas Hidráulicas Seminário: eclusas**. 2005. 29 f. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KEMPKA, M. **Determinação das pressões a jusante de comportas segmento invertidas: aplicação em eclusas de navegação**. 2011. 95 f. Trabalho de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007.

MOVIMENTO DE SOLIDARIEDADE ÍBERO-AMERICANA. **Hidroviás e Eclusas na pauta de MT**. Disponível em: <<http://www.blogdoambientalismo.com/hidrovias-e-eclusas-na-pauta-de-mt>>. Acesso em: 12 maio 2011.

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.

PINTO, N. L. S. **Hidráulica Aplicada**. Cap. II. p. 17 – 39. Curso de Pós Graduação em Engenharia Hidráulica. Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza. Universidade Federal do Paraná. Ano não disponível.

POR VIAS SEGURAS. **Estatísticas de acidentes de trânsito**. Associação brasileira de acidentes de transito. 2013. Disponível em: <[http://www.vias-seguras.com/index.php/os\\_acidentes/estatisticas](http://www.vias-seguras.com/index.php/os_acidentes/estatisticas)>. Acesso em: 17 nov. 2013.

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

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.

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.

SECRETARIA DOS TRANSPORTES. **Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário**. Brasília, 2010.



SEED. Energia e Mudança do Clima Global. **Fontes Alternativas de Energia: Energia Hidrelétrica**. 2013. Disponível em: [www.planetseed.com/pt-br/relatedarticle/fontes-alternativas-de-energia-energia-hidreletrica](http://www.planetseed.com/pt-br/relatedarticle/fontes-alternativas-de-energia-energia-hidreletrica). Acesso em: 13 set. 2013.

SILVA, P.J. Viabilidade **de adoção de ascensores, como sistemas auxiliares, em obras de transposição**. In: 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro: 2012.

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. **Hydrodinamic pressure of filling and emptying system and flow-induced vibration of reversed tainter gate of the lock at Wuqiangxi Hydroproject**. XXVIII IAHR Congress. 1999.

STEFANO, F. **A questão hidrelétrica no Brasil**. National Geographic Brasil. Edição especial de energia. Jun. 2012. Disponível em: <http://viajeaqui.abril.com.br/materias/questao-hidreletrica-brasil>. Acesso em: 5 abr. 2014.

TERRES, C. J. F. **Avaliação de Revestimentos de Aços Inoxidáveis Depositados por Aspersão Térmica**. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

TULLIS, J. P. **Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação: cavitação em sistemas hidráulicos**. São Paulo, Centro Tecnológico de Hidráulica, 1982.

TONDOWSKI, L. **Modelos reduzidos e efeitos de escala em eclusas de navegação**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 1987.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of the Army. Corpo of Engineers. Office of the Chief of Engineers. **EM 1110-2-1610: engineering and desing – hydraulic design of lock culvert valves**. Washington, DC, 1975. Disponível em: <[http://140.194.76.129/cgi-bin/publications/redirect\\_HQP\\_public?pub\\_type=EM](http://140.194.76.129/cgi-bin/publications/redirect_HQP_public?pub_type=EM)> Acesso em: 27 maio 2011.

\_\_\_\_\_. Department of the Army. Corp of Engineers. Office of the Chief of Engineers. **EM 1110-2-2602: planning and design of navigation locks**. Washington, DC, 1995. Disponível em: <<http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-2602/toc.htm>> Acesso em: 27 maio 2011.

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.

VIRGIL, E. J. Jr. **Mechanics of Cavitation**. 1963. Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the America Society of Civil Engineers.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Pressões obtidas na base da galeria.

L(10)	P(10) Q22l/s	P(10) Q28l/s	P(10) Q32l/s		
0.1576	0.2891	0.2342	0.1924		
0.2076	0.2718	0.2100	0.1626		
0.2576	0.2608	0.1938	0.1402		
0.3076	0.2915	0.2309	0.1826		
0.4576	0.2819	0.2201	0.1714		
0.5076	0.2722	0.2092	0.1603		
0.6196	0.2701	0.2053	0.1546		
0.7196	0.2976	0.2486	0.2117		
0.8196	0.3272	0.2888	0.2611		
0.9196	0.3491	0.3335	0.3225		
1.1196	0.3609	0.3576	0.3563		
1.3216	0.3951	0.4023	0.4067		
1.7216	0.3963	0.4044	0.4091		
1.9256	0.3955	0.4040	0.4090		
L(20)	P(20) Q22l/s	P(20) Q28l/s	P(20) Q32l/s		
0.1354	0.3307	0.3027	0.2792		
0.1854	0.3171	0.2856	0.2607		
0.2354	0.3120	0.2760	0.2494		
0.2854	0.3373	0.3047	0.2797		
0.4354	0.3297	0.2968	0.2724		
0.4854	0.3221	0.2890	0.2651		
0.5974	0.3291	0.2954	0.2705		
0.6974	0.3465	0.3222	0.3037		
0.7974	0.3674	0.3479	0.3327		
0.8974	0.3685	0.3612	0.3540		
1.0974	0.3654	0.3643	0.3628		
1.2994	0.3960	0.4032	0.4073		
1.6994	0.3965	0.4042	0.4092		
1.9034	0.3958	0.4040	0.4094		
L(30)	P(30) Q22l/s	P(30) Q28l/s	P(30) Q32l/s	P(30) Q40l/s	P(30) Q60l/s
0.1167	0.3522	0.3375	0.3270	0.2980	0.1787
0.1667	0.3384	0.3215	0.3071	0.2711	0.1300
0.2167	0.3344	0.3169	0.2999	0.2618	0.1137
0.2667	0.3585	0.3410	0.3267	0.2894	0.1479
0.4167	0.3507	0.3329	0.3189	0.2822	0.1435
0.4667	0.3429	0.3247	0.3110	0.2750	0.1391
0.5787	0.3494	0.3335	0.3191	0.2838	0.1545
0.6787	0.3643	0.3530	0.3424	0.3174	0.2166
0.7787	0.3821	0.3731	0.3659	0.3467	0.2650

0.8787	0.3793	0.3773	0.3743	0.3673	0.3337	
1.0787	0.3684	0.3709	0.3715	0.3731	0.3672	
1.2807	0.3966	0.4037	0.4081	0.4172	0.4396	
1.6807	0.3966	0.4043	0.4092	0.4193	0.4456	
1.8847	0.3959	0.4039	0.4094	0.4201	0.4491	
L(40)	P(40) Q22l/s	P(40) Q28l/s	P(40) Q32l/s	P(40) Q40l/s	P(40) Q60l/s	P(40) Q80l/s
0.1009	0.3696	0.3652	0.3605	0.3486	0.2988	0.2146
0.1509	0.3521	0.3441	0.3367	0.3166	0.2338	0.1064
0.2009	0.3491	0.3400	0.3314	0.3092	0.2204	0.0846
0.2509	0.3714	0.3634	0.3549	0.3337	0.2481	0.1188
0.4009	0.3629	0.3551	0.3466	0.3261	0.2441	0.1187
0.4509	0.3545	0.3468	0.3384	0.3185	0.2401	0.1186
0.5629	0.3538	0.3477	0.3417	0.3254	0.2557	0.1474
0.6629	0.3768	0.3736	0.3698	0.3595	0.3104	0.2323
0.7629	0.3934	0.3928	0.3911	0.3846	0.3495	0.2921
0.8629	0.3848	0.3874	0.3889	0.3908	0.3842	0.3650
1.0629	0.3712	0.3762	0.3793	0.3854	0.3934	0.3957
1.2649	0.3971	0.4047	0.4100	0.4202	0.4448	0.4709
1.6649	0.3968	0.4046	0.4100	0.4207	0.4480	0.4776
1.8689	0.3960	0.4041	0.4096	0.4208	0.4499	0.4825
L(50)	P(50) Q22l/s	P(50) Q28l/s	P(50) Q32l/s	P(50) Q40l/s	P(50) Q60l/s	P(50) Q80l/s
0.0877	0.3788	0.3798	0.3797	0.3777	0.3615	0.3286
0.1377	0.3620	0.3592	0.3558	0.3461	0.3021	0.2302
0.1877	0.3569	0.3548	0.3503	0.3388	0.2885	0.2105
0.2377	0.3803	0.3777	0.3740	0.3625	0.3154	0.2392
0.3877	0.3712	0.3686	0.3649	0.3546	0.3107	0.2389
0.4377	0.3620	0.3595	0.3558	0.3467	0.3061	0.2385
0.5497	0.3765	0.3767	0.3756	0.3702	0.3439	0.2945
0.6497	0.3856	0.3878	0.3884	0.3869	0.3745	0.3451
0.7497	0.4019	0.4051	0.4065	0.4081	0.4045	0.3882
0.8497	0.3893	0.3951	0.3993	0.4045	0.4169	0.4231
1.0497	0.3731	0.3800	0.3844	0.3924	0.4120	0.4288
1.2517	0.3980	0.4060	0.4114	0.4219	0.4497	0.4784
1.6517	0.3971	0.4053	0.4107	0.4214	0.4505	0.4810
1.8557	0.3963	0.4046	0.4102	0.4213	0.4515	0.4842
L(60)	P(60) Q22l/s	P(60) Q28l/s	P(60) Q32l/s	P(60) Q40l/s	P(60) Q60l/s	P(60) Q80l/s
0.0767	0.3860	0.3901	0.3921	0.3948	0.3970	0.3910
0.1267	0.3752	0.3770	0.3762	0.3735	0.3556	0.3218
0.1767	0.3785	0.3796	0.3787	0.3755	0.3542	0.3146
0.2267	0.3958	0.3967	0.3956	0.3932	0.3745	0.3386
0.3767	0.3896	0.3914	0.3905	0.3882	0.3719	0.3392
0.4267	0.3834	0.3861	0.3854	0.3832	0.3693	0.3398
0.5387	0.3857	0.3898	0.3922	0.3958	0.3972	0.3898

0.6387	0.3928	0.3981	0.4016	0.4075	0.4173	0.4216
0.7387	0.4029	0.4086	0.4131	0.4216	0.4382	0.4511
0.8387	0.3934	0.4011	0.4057	0.4142	0.4376	0.4614
1.0387	0.3802	0.3882	0.3931	0.4029	0.4284	0.4549
1.2407	0.3973	0.4053	0.4113	0.4225	0.4519	0.4840
1.6407	0.3975	0.4056	0.4116	0.4228	0.4526	0.4852
1.8447	0.3957	0.4039	0.4099	0.4213	0.4520	0.4858
L(70)	P(70) Q22l/s	P(70) Q28l/s	P(70) Q32l/s	P(70) Q40l/s	P(70) Q60l/s	P(70) Q80l/s
0.0678	0.39963	0.3947	0.3984	0.4050	0.4191	0.4303
0.1178	0.38787	0.3862	0.3886	0.3933	0.3968	0.3931
0.1678	0.39360	0.3896	0.3918	0.3965	0.3975	0.3919
0.2178	0.41228	0.4039	0.4069	0.4103	0.4145	0.4134
0.3678	0.36331	0.4014	0.4046	0.4104	0.4178	0.4202
0.4178	0.39051	0.3989	0.4023	0.4105	0.4211	0.4269
0.5298	0.39963	0.3975	0.4023	0.4118	0.4336	0.4538
0.6298	0.40564	0.4030	0.4082	0.4179	0.4442	0.4702
0.7298	0.42261	0.4097	0.4144	0.4245	0.4519	0.4804
0.8298	0.40635	0.4030	0.4090	0.4196	0.4495	0.4804
1.0298	0.38601	0.3923	0.3982	0.4104	0.4404	0.4720
1.2318	0.40712	0.4047	0.4105	0.4216	0.4526	0.4864
1.6318	0.40659	0.4054	0.4112	0.4222	0.4531	0.4867
1.8358	0.40501	0.4034	0.4092	0.4205	0.4516	0.4855
L(80)	P(80) Q22l/s	P(80) Q28l/s	P(80) Q32l/s	P(80) Q40l/s	P(80) Q60l/s	P(80) Q80l/s
0.0608	0.3922	0.3996	0.4035	0.4125	0.4360	0.4588
0.1108	0.3808	0.3879	0.3982	0.4067	0.4266	0.4445
0.1608	0.3862	0.3936	0.4022	0.4114	0.4320	0.4504
0.2108	0.4053	0.4123	0.4156	0.4248	0.4482	0.4685
0.3608	0.3938	0.4014	0.4141	0.4238	0.4480	0.4724
0.4108	0.3822	0.3905	0.4127	0.4228	0.4478	0.4762
0.5228	0.3909	0.3996	0.4074	0.4185	0.4484	0.4809
0.6228	0.3968	0.4056	0.4113	0.4227	0.4542	0.4887
0.7228	0.4143	0.4226	0.4164	0.4278	0.4597	0.4947
0.8228	0.3981	0.4064	0.4101	0.4212	0.4537	0.4882
1.0228	0.3772	0.3860	0.4000	0.4116	0.4420	0.4770
1.2248	0.3985	0.4071	0.4106	0.4220	0.4535	0.4884
1.6248	0.3980	0.4066	0.4111	0.4224	0.4532	0.4873
1.8288	0.3964	0.4050	0.4092	0.4204	0.4514	0.4858
P(100)	P(100) Q22l/s	P(100) Q28l/s	P(100) Q32l/s	P(100) Q40l/s	P(100) Q60l/s	P(100) Q80l/s
0.056	0.3948	0.4037	0.4087	0.4204	0.4541	0.4915
0.156	0.3840	0.3924	0.4043	0.4166	0.4493	0.4853
0.206	0.3896	0.3977	0.4079	0.4206	0.4510	0.4875
0.256	0.4086	0.4177	0.4197	0.4318	0.4661	0.5045
0.356	0.3963	0.4050	0.4156	0.4293	0.4605	0.4970

0.406	0.3839	0.3924	0.4115	0.4267	0.4549	0.4894
0.618	0.3916	0.4008	0.4081	0.4201	0.4527	0.4894
0.718	0.3974	0.4063	0.4123	0.4239	0.4576	0.4948
0.818	0.4148	0.4236	0.4193	0.4293	0.4643	0.5015
1.018	0.3977	0.4064	0.4115	0.4225	0.4554	0.4912
1.220	0.3772	0.3862	0.3979	0.4105	0.4408	0.4756
1.620	0.3985	0.4071	0.4112	0.4220	0.4540	0.4887
1.824	0.3980	0.4065	0.4110	0.4220	0.4528	0.4865
2.024	0.3964	0.4049	0.4091	0.4201	0.4510	0.4851

## 9.2 Pressões obtidas no teto da galeria.

L(10)	P(10) Q22l/s	P(10) Q28l/s	P(10) Q32l/s
0.1576	0.0021	-0.0709	-0.1279
0.2076	-0.0131	-0.0878	-0.1461
0.2576	-0.0048	-0.0826	-0.1434
0.3076	0.0010	-0.0759	-0.1357
0.4576	-0.0081	-0.0833	-0.1420
0.5076	0.0077	-0.0644	-0.1211
0.6196	0.0122	-0.0528	-0.1039
0.7196	0.0332	-0.0229	-0.0643
0.8196	0.0940	0.0455	0.0106
0.9196	0.0581	0.0196	-0.0072
1.1196	0.1038	0.0877	0.0782
1.3216	0.1589	0.1592	0.1613
1.7216	0.1486	0.1564	0.1614
1.9256	0.1520	0.1606	0.1655
2.1256	0.1452	0.1538	0.1588
2.3256	0.1796	0.1894	0.1957
L(20)	P(20) Q22l/s	P(20) Q28l/s	P(20) Q32l/s
0.1354	0.0559	0.0184	-0.0112
0.1854	0.0438	0.0058	-0.0253
0.2354	0.0536	0.0139	-0.0174
0.2854	0.0580	0.0185	-0.0122
0.4354	0.0525	0.0153	-0.0141
0.4854	0.0675	0.0326	0.0043
0.5974	0.0703	0.0379	0.0118
0.6974	0.0849	0.0568	0.0339
0.7974	0.1460	0.1242	0.1049
0.8974	0.0950	0.0781	0.0629
1.0974	0.1212	0.1125	0.1045
1.2994	0.1645	0.1680	0.1668
1.6994	0.1491	0.1569	0.1618

1.9034	0.1525	0.1611	0.1666			
2.1034	0.1456	0.1540	0.1596			
2.3034	0.1854					
L(30)	P(30) Q22l/s	P(30) Q28l/s	P(30) Q32l/s	P(30) Q40l/s	P(30) Q60l/s	P(30) Q80l/s
0.1167	0.0799	0.0600	0.0430	0.0002	-0.1608	-0.3960
0.1667	0.0691	0.0489	0.0315	-0.0122	-0.1766	-0.4148
0.2167	0.0795	0.0581	0.0399	-0.0050	-0.1752	-0.4209
0.2667	0.0827	0.0618	0.0440	0.0005	-0.1649	-0.4049
0.4167	0.0775	0.0575	0.0403	-0.0015	-0.1600	-0.3898
0.4667	0.0926	0.0737	0.0571	0.0166	-0.1358	-0.3573
0.5787	0.0935	0.0764	0.0615	0.0241	-0.1149	-0.3192
0.6787	0.1070	0.0920	0.0801	0.0472	-0.0741	-0.2545
0.7787	0.1684	0.1575	0.1466	0.1206	0.0148	-0.1376
0.8787	0.1142	0.1058	0.0972	0.0782	-0.0029	-0.1249
1.0787	0.1294	0.1267	0.1237	0.1180	0.0826	0.0234
1.2807	0.1706	0.1743	0.1753	0.1783	0.1785	0.1680
1.6807	0.1495	0.1573	0.1621	0.1719	0.1992	0.2259
1.8847	0.1530	0.1611	0.1664	0.1771	0.2067	0.2374
2.0847	0.1457	0.1541	0.1597	0.1707	0.2012	0.2336
2.2847					0.2471	0.2794
L(40)	P(40) Q22l/s	P(40) Q28l/s	P(40) Q32l/s	P(40) Q40l/s	P(40) Q60l/s	P(40) Q80l/s
0.1009	0.0937	0.0827	0.0736	0.0488	-0.0498	-0.1984
0.1509	0.0845	0.0744	0.0641	0.0377	-0.0625	-0.2152
0.2009	0.0945	0.0834	0.0730	0.0461	-0.0580	-0.2147
0.2509	0.0958	0.0855	0.0755	0.0501	-0.0499	-0.2023
0.4009	0.0926	0.0825	0.0733	0.0491	-0.0453	-0.1900
0.4509	0.1071	0.0978	0.0894	0.0666	-0.0233	-0.1616
0.5629	0.1083	0.1004	0.0930	0.0737	-0.0053	-0.1275
0.6629	0.1204	0.1138	0.1084	0.0935	0.0285	-0.0714
0.7629	0.1831	0.1798	0.1751	0.1645	0.1142	0.0326
0.8629	0.1282	0.1274	0.1246	0.1175	0.0831	0.0217
1.0629	0.1353	0.1386	0.1399	0.1410	0.1327	0.1122
1.2649	0.1750	0.1820	0.1848	0.1927	0.2036	0.2124
1.6649	0.1498	0.1577	0.1633	0.1743	0.2019	0.2326
1.8689	0.1532	0.1613	0.1669	0.1781	0.2076	0.2406
2.0689	0.1459	0.1541	0.1597	0.1712	0.2015	0.2356
2.2689	0.1907	0.2015	0.2065	0.2184	0.2493	0.2831
L(50)	P(50) Q22l/s	P(50) Q28l/s	P(50) Q32l/s	P(50) Q40l/s	P(50) Q60l/s	P(50) Q80l/s
0.0877	0.1025	0.0975	0.0927	0.0788	0.0195	-0.0722
0.1377	0.0939	0.0888	0.0834	0.0684	0.0073	-0.0873
0.1877	0.1040	0.0988	0.0932	0.0781	0.0160	-0.0815
0.2377	0.1057	0.1007	0.0949	0.0813	0.0230	-0.0711
0.3877	0.1022	0.0983	0.0936	0.0814	0.0280	-0.0559

0.4377	0.1170	0.1135	0.1096	0.0987	0.0495	-0.0285
0.5497	0.1183	0.1167	0.1139	0.1057	0.0685	0.0046
0.6497	0.1305	0.1313	0.1297	0.1248	0.1005	0.0532
0.7497	0.1931	0.1955	0.1966	0.1956	0.1822	0.1503
0.8497	0.1352	0.1390	0.1411	0.1419	0.1394	0.1218
1.0497	0.1392	0.1455	0.1490	0.1550	0.1678	0.1741
1.2517	0.1783	0.1857	0.1911	0.1994	0.2208	0.2420
1.6517	0.1504	0.1587	0.1642	0.1751	0.2050	0.2369
1.8557	0.1535	0.1618	0.1673	0.1786	0.2090	0.2419
2.0557	0.1461	0.1545	0.1602	0.1715	0.2025	0.2363
2.2557	0.1945	0.2035	0.2095	0.2211	0.2520	0.2852
L(60)	P(60) Q22l/s	P(60) Q28l/s	P(60) Q32l/s	P(60) Q40l/s	P(60) Q60l/s	P(60) Q80l/s
0.0767	0.1228	0.1228	0.1199	0.1130	0.0817	0.0270
0.1267	0.1100	0.1094	0.1068	0.0993	0.0666	0.0081
0.1767	0.1200	0.1195	0.1170	0.1097	0.0765	0.0196
0.2267	0.1254	0.1258	0.1226	0.1160	0.0852	0.0312
0.3767	0.1180	0.1191	0.1176	0.1135	0.0908	0.0488
0.4267	0.1343	0.1360	0.1351	0.1325	0.1144	0.0791
0.5387	0.1287	0.1316	0.1327	0.1334	0.1266	0.1079
0.6387	0.1368	0.1405	0.1438	0.1476	0.1507	0.1446
0.7387	0.1787	0.1827	0.1887	0.1954	0.2072	0.2153
0.8387	0.1416	0.1485	0.1524	0.1602	0.1765	0.1896
1.0387	0.1479	0.1546	0.1599	0.1694	0.1924	0.2164
1.2407	0.1783	0.1851	0.1910	0.2026	0.2311	0.2603
1.6407	0.1540	0.1623	0.1683	0.1797	0.2101	0.2440
1.8447	0.1573	0.1656	0.1714	0.1828	0.2134	0.2478
2.0447	0.1481	0.1563	0.1618	0.1728	0.2036	0.2380
2.2447	0.1776	0.1847	0.1932	0.2058	0.2385	0.2755
L(70)	P(70) Q22l/s	P(70) Q28l/s	P(70) Q32l/s	P(70) Q40l/s	P(70) Q60l/s	P(70) Q80l/s
0.0678	0.1322	0.1338	0.1353	0.1340	0.1237	0.1041
0.1178	0.1215	0.1198	0.1216	0.1233	0.1119	0.0886
0.1678	0.1390	0.1313	0.1325	0.1341	0.1243	0.1019
0.2178	0.1412	0.1364	0.1379	0.1409	0.1333	0.1123
0.3678	0.1333	0.1329	0.1359	0.1420	0.1480	0.1453
0.4178	0.1505	0.1501	0.1535	0.1609	0.1719	0.1766
0.5298	0.1500	0.1426	0.1473	0.1562	0.1751	0.1917
0.6298	0.1524	0.1473	0.1528	0.1622	0.1861	0.2094
0.7298	0.2062	0.1781	0.1827	0.1903	0.2170	0.2457
0.8298	0.1538	0.1516	0.1566	0.1678	0.1947	0.2245
1.0298	0.1562	0.1597	0.1654	0.1778	0.2073	0.2390
1.2318	0.1939	0.1805	0.1868	0.1963	0.2267	0.2623
1.6318	0.1638	0.1619	0.1679	0.1788	0.2102	0.2452
1.8358	0.1666	0.1654	0.1714	0.1819	0.2130	0.2479

2.0358	0.1569	0.1571	0.1629	0.1741	0.2047	0.2384
2.2358	0.2045	0.1734	0.1792	0.1837	0.2166	0.2557
L(80)	P(80) Q22l/s	P(80) Q28l/s	P(80) Q32l/s	P(80) Q40l/s	P(80) Q60l/s	P(80) Q80l/s
0.0608	0.1274	0.1322	0.1415	0.1458	0.1521	0.1510
0.1108	0.1163	0.1215	0.1303	0.1345	0.1394	0.1365
0.1608	0.1334	0.1390	0.1435	0.1491	0.1591	0.1599
0.2108	0.1352	0.1412	0.1511	0.1578	0.1727	0.1800
0.3608	0.1252	0.1333	0.1490	0.1597	0.1877	0.2145
0.4108	0.1419	0.1505	0.1648	0.1758	0.2049	0.2352
0.5228	0.1416	0.1500	0.1540	0.1648	0.1940	0.2269
0.6228	0.1430	0.1524	0.1563	0.1675	0.1964	0.2305
0.7228	0.1974	0.2062	0.1813	0.1935	0.2265	0.2615
0.8228	0.1448	0.1538	0.1594	0.1704	0.2005	0.2340
1.0228	0.1479	0.1562	0.1679	0.1790	0.2100	0.2452
1.2248	0.1851	0.1939	0.1864	0.1969	0.2307	0.2651
1.6248	0.1552	0.1638	0.1675	0.1790	0.2108	0.2458
1.8288	0.1581	0.1666	0.1707	0.1821	0.2133	0.2475
2.0288	0.1484	0.1569	0.1630	0.1742	0.2041	0.2377
2.2288	0.1954	0.2045	0.1724	0.1834	0.2166	0.2507
L(100)	P(100) Q22l/s	P(100) Q28l/s	P(100) Q32l/s	P(100) Q40l/s	P(100) Q60l/s	P(100) Q80l/s
0.056	0.1337	0.1426	0.1542	0.1676	0.1989	0.2341
0.106	0.1226	0.1317	0.1407	0.1546	0.1852	0.2221
0.156	0.1394	0.1485	0.1540	0.1672	0.1989	0.2360
0.206	0.1398	0.1484	0.1575	0.1715	0.2024	0.2386
0.356	0.1267	0.1358	0.1497	0.1632	0.1943	0.2311
0.406	0.1431	0.1521	0.1643	0.1778	0.2081	0.2444
0.518	0.1421	0.1509	0.1534	0.1650	0.1940	0.2266
0.618	0.1450	0.1532	0.1576	0.1679	0.1994	0.2335
0.718	0.1975	0.2062	0.1888	0.1962	0.2367	0.2770
0.818	0.1448	0.1532	0.1604	0.1709	0.2020	0.2358
1.018	0.1472	0.1557	0.1672	0.1789	0.2097	0.2446
1.220	0.1858	0.1933	0.1898	0.1986	0.2347	0.2684
1.620	0.1551	0.1637	0.1678	0.1785	0.2109	0.2457
1.824	0.1581	0.1665	0.1711	0.1815	0.2132	0.2470
2.024	0.1484	0.1568	0.1618	0.1729	0.2025	0.2352
2.224	0.1948	0.2036	0.1783	0.1834	0.2239	0.2604