

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

ANÁLISE DAS PRESSÕES MÍNIMAS A JUSANTE
DE COMPORTA TIPO SEGMENTO INVERTIDA EM
ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

CÁSSIUS PALAURO

Porto Alegre
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

ANÁLISE DAS PRESSÕES MÍNIMAS A JUSANTE
DE COMPORTA TIPO SEGMENTO INVERTIDA EM
ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

ENG^o CIVIL CÁSSIUS PALAURO

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

Orientador: Prof. Marcelo Giulian Marques

Porto Alegre
2012

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

Área de Concentração:

Hidráulica

Professor Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques (IPH/UFRGS)

Banca Examinadora:

Eder Daniel Teixeira

Edith Beatriz Camaño Schettini

Luiz Rafael Palmier

Maurício Dai Prá

Data da defesa: 31 de agosto de 2012.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

Em especial a Adrimara pelo amor, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo e apoio, nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Marcelo Giulian Marques pelos ensinamentos, orientação e confiança.

Aos engenheiros Alba Valéria Brandão Canellas e Marcos da Rocha Botelho, pelo incentivo e aprendizado.

Aos colegas do Laboratório de Obras Hidráulicas: Mariane Kempka, Leandro do Espírito Santo Soares, Maximiliano Paschoaloti Messa, Guilherme Ruschel Finger e Luciano Faustino, pelo apoio na pesquisa e coleta de dados nos modelos.

A equipe técnica do LAHE: Gilson Pereira Guias, Felipe Santana, Diego Maciel, que foi indispensável na pesquisa e coleta de dados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE) – ELETROBRAS – FURNAS, pela estrutura oferecida para a realização desta pesquisa.

A todas as pessoas que de alguma forma auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Eclusas de navegação são estruturas utilizadas para transposição de desníveis por embarcações. Estes desníveis podem ser causados por obstáculos naturais ou artificiais. As eclusas de navegação devem ter como principais características a realização de uma transposição rápida e segura das embarcações. O estudo dos escoamentos a jusante das comportas nos condutos de enchimento e esvaziamento das eclusas são de grande importância, pois são escoamentos altamente turbulentos e com altas velocidades e regiões de baixas pressões, essas, por sua vez, podem ocasionar o fenômeno de cavitação. A cavitação tem efeitos nocivos às estruturas, podendo causar desde vibrações até a erosão nas estruturas de concreto.

Esta pesquisa busca verificar o comportamento e desenvolver critérios para estimar as pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida, quando da operação da mesma em condutos de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação. Para atendimento desses objetivos, foi construído, no laboratório de hidráulica experimental LAHE, um modelo hidráulico reduzido de uma eclusa de navegação, onde foram realizados os ensaios com medição de pressões “instantâneas” a jusante da comporta no teto e na base do conduto. Essas medições foram realizadas para diferentes condições de aberturas e cargas a montante da comporta em regime permanente e em regime transitório, onde foram utilizadas diferentes velocidades de operação da comporta. Através das análises das pressões, foi possível verificar que a condição em regime permanente é mais crítica que a em regime transitório, sugerindo que se utilize esta situação para a previsão das pressões mínimas que podem ocorrer durante a operação da comporta.

ABSTRACT

Navigation Locks are structures used for raising and lowering boats between stretches of water of different levels on rivers due to natural or artificial obstacles. Navigation Locks' design shall aim a safe and fast boat transposition. The study of flow downstream of tainter gates inside the conduits is important because of the flow characteristics that are highly turbulent and with areas of low pressure. The occurrence of low pressure may induce the cavitation phenomenon which causes severe damages, going from vibration to erosion in concrete structures.

This research aims to verify the behavior and to develop a criterion to estimate low flow pressures downstream of a tainter gate during its operation in conduits of navigation locks during the chamber filling and emptying. To fulfill this aim, it has been built, at the hydraulic experimental lab of Furnas, a reduced scale model of a navigation lock, where were held studies with instantaneous measure of pressure downstream the gate, both in the upper and lower conduit level. Those studies were made for different conditions of the gate's aperture and water level upstream it for both permanent and transitory flows. Different speeds of gate aperture were also studied. By analyzing the results it was possible to conclude that, regarding to minimum pressures, the permanent flow condition is more severe than the transitory one indicating that the former shall be used to predict the lower pressures in similar conditions.

CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	APRESENTAÇÃO	1
1.2.	OBJETIVO GERAL	2
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	HISTÓRICO	4
2.2.	ASPECTOS GERAIS	6
2.3.	CLASSIFICAÇÃO DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO	7
2.4.	PROBLEMAS HIDRÁULICOS EM ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO	8
2.5.	COMPORTAS EM ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO	10
2.6.	ESCOAMENTO SOB COMPORTAS	12
2.7.	ESTUDO DAS PRESSÕES A JUSANTE DE COMPORTAS	15
2.8.	DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO MÍNIMA	17
2.9.	CAVITAÇÃO	19
2.9.1.	Cavitação em eclusas de navegação	20
2.9.2.	Índice de cavitação a jusante da comporta	21
2.10.	CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA EM MODELOS REDUZIDOS	25
3.	METODOLOGIA E INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	27
3.1.	MODELO EXPERIMENTAL	27
3.2.	ENSAIOS REALIZADOS	34
3.2.1.	Ensaio em regime permanente	35
3.2.1.1.	Ensaio preliminar em regime permanente com piezômetros	35
3.2.1.2.	Ensaio em regime permanente com transdutor	38
3.2.2.	Ensaio em regime transitório	39
3.2.2.1.	Ensaio preliminar em regime transitório com transdutor	39
3.2.2.2.	Ensaio em regime transitório com parada e com transdutor	41
3.3.	COEFICIENTE DA “VENA CONTRACTA”	43
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1.	ANÁLISES EM REGIME PERMANENTE	44
4.1.1.	Comportamento da distribuição longitudinal das pressões médias	44

4.1.1.1.	Comportamento das pressões médias na base do conduto	46
4.1.1.2.	Comportamento das pressões médias no teto do conduto	49
4.1.2.	Comportamento do coeficiente de pressão média mínima (CP_{min})	51
4.1.3.	Comportamento das flutuações de pressão	54
4.1.3.1.	Flutuação de pressão na base do conduto	55
4.1.3.2.	Flutuação de pressão no teto do conduto	58
4.1.3.3.	Coeficiente de flutuação de pressão	60
4.1.4.	Coeficiente de assimetria	63
4.1.5.	Coeficiente de curtose	64
4.1.6.	Distribuição de probabilidade $P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$	65
4.2.	ANÁLISE EM REGIME TRANSITÓRIO	68
4.2.1.	Pressões médias das amostras de um segundo	74
4.2.2.	Pressões $P_{1\%}$ e coeficientes de pressão $CP_{1\%}$ das amostras de um segundo	76
4.3.	COMPARATIVO ENTRE AS PRESSÕES EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO	78
4.3.1.	Comparativo entre as pressões em regime permanente e transitório no instante da passagem por uma abertura	78
4.3.2.	Comparativo entre as pressões em regime transitório no instante da passagem por uma abertura e a pressão mínima amostral	80
5.	CONCLUSÕES	83
6.	RECOMENDAÇÕES	86
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	ANEXOS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Eclusa 1 de Tucuruí (Fonte: ELETRONORTE, 2011)	5
Figura 2. Sequência de eclusagem do sistema de eclusas da usina de Tucuruí (Adaptado de PLEC, 2010)	7
Figura 3. Eclusa de alta queda – Tucuruí – PA (Fonte: ELETRONORTE, 2011)	8
Figura 4. Comportas tipo segmento instalada em vertedor.(USACE, 2010)	10
Figura 5. Comporta tipo segmento invertida (adaptado de USACE, 1975).....	11
Figura 6. Parâmetros do escoamento a jusante de uma comporta (Adaptado de LIN et al. 2002)	12
Figura 7. Visualização da “vena contracta” com injeção de corante para a abertura de 40% ...	13
Figura 8. Tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos (BATTISTON apud SHARMA, 1976)	13
Figura 9. Pontos de baixas pressões em escoamentos sob comportas de eclusas. (BATTISTON, 2008).....	14
Figura 10. Comparação de pressões médias adimensionais (MEES et al. 2008).	16
Figura 11. Limite superior do ressalto hidráulico e teto do conduto (Adaptado de SMITH & CHEN, 1989)	17
Figura 12. Linha de energia e piezométrica. (adaptado de USSAMI et al. 1983 b)	18
Figura 13. Três formas de implosão das bolhas de cavitação (GREIN & WYSS, 1974).....	19
Figura 14. Índice de cavitação para comporta de segmento invertida (Adaptado de BRIGHETTI & DOURADO, 1988)	22
Figura 15. Critério para cavitação em comporta tipo vagão (DOURADO, 1986).	23
Figura 16. Comparação dos valores de δ para comportas tipo segmento invertida (IPH) com os valores de δ para comportas tipo vagão (KEMPKA, 2011)	24
Figura 17. Valores de δ (índice de cavitação) para início dos danos (adaptado de KHATSURIA, 2005).	24
Figura 18. Arranjo geral do modelo reduzido - escala 1:25	28
Figura 19. Instalação experimental	29
Figura 20. Detalhes da estruturas construídas em acrílico no modelo reduzido.....	29
Figura 21. Detalhes do medidor de vazão e painel de visualização.....	30
Figura 22. Quadro piezométrico utilizado nas medições de pressão preliminares.	30
Figura 23. Detalhes dos transdutores de pressão utilizados	31
Figura 24. Transdutores para o monitoramento dos níveis das cubas.....	32
Figura 25. Potenciômetro para registro da abertura da comporta e sistema mecânico de acionamento.....	33
Figura 26. Sistema de controle e aquisição de dados	34
Figura 27. Esquema geral da eclusa implantada no LAHE	35
Figura 28. Posicionamento das tomadas piezométricas.	36
Figura 29. Pressões médias (piezômetros) medidas na base do conduto a jusante da comporta para diferentes aberturas e vazões.....	37

Figura 30. Posição das tomadas de pressão para os ensaios em regime permanente.....	37
Figura 31. Leis de abertura lineares utilizadas	40
Figura 32. Posicionamento das tomadas de pressão nos condutos	41
Figura 33. Estrutura utilizada para determinação da “vena contracta”	43
Figura 34. Coeficiente de contração na comporta - comparação com a literatura	43
Figura 35. Identificação da zona de pressões mínimas e zona de escoamento plenamente estabelecido	45
Figura 36. Visualização do escoamento para uma abertura de 40% e posicionamento das tomadas de pressão	45
Figura 37. Distribuição das pressões médias ao longo do conduto para abertura de comporta de 30% e vazão de 19,7 l/s	46
Figura 38. Comportamento das pressões médias para a base do conduto para diferentes vazões e aberturas de comporta fixa	47
Figura 39. Comportamento das pressões médias para a base do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta	49
Figura 40. Comportamento das pressões médias para o teto do conduto para diferentes vazões e abertura de comporta fixa	50
Figura 41. Comportamento das pressões médias para o teto do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta	51
Figura 42. Coeficiente de pressão (CP_{min}) para a base do conduto	53
Figura 43. Coeficiente de pressão (CP_{min}) para o teto do conduto, com equação da envoltória inferior.....	54
Figura 44. Comportamento das flutuações de pressão para a base e teto do conduto para uma abertura de 30% e vazão de 19,7 l/s	55
Figura 45. Comparação da pressão média com a flutuação de pressão ao longo da base do conduto para uma abertura de 30% e vazão de 19,7 l/s	56
Figura 46. Comportamento da flutuação de pressão na base do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta	57
Figura 47. Comportamento das flutuações de pressão para a base do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta	58
Figura 48. Comportamento da flutuação de pressão no teto do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta	59
Figura 49. Comportamento das flutuações de pressão para o teto do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta	60
Figura 50. Coeficiente adimensional de flutuação de pressão para a base do conduto nas posições T5, T6 e T7.....	61
Figura 51. Coeficiente adimensional de flutuação de pressão para o teto do conduto nas posições T5, T6 e T7.....	62
Figura 52. Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão para os pontos de pressão mínima no teto e na base do conduto	62

Figura 53. Distribuição do coeficiente de assimetria para a base e teto do conduto para os pontos onde ocorreram as pressões mínimas	64
Figura 54. Distribuição do coeficiente de curtose para a base e teto do conduto para os pontos de pressões mínimas	65
Figura 55. Distribuição do $CP_{1\%}$ para a base do conduto	66
Figura 56. Distribuição do $CP_{1\%}$ para o teto do conduto.....	66
Figura 57. Distribuição do $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto	67
Figura 58. Distribuição do $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto.....	67
Figura 59. Comparação entre as posições T5, T6 e T7 no teto para abertura total e velocidades de abertura de 3,6mm/s e desnível H3 (0,80m).....	69
Figura 60. Desenvolvimento das pressões com interrupção na posição T6 no teto com velocidade de abertura de 3,6mm/s e desnível H3	70
Figura 61. Pressões em regime transitório com interrupção para as aberturas de 10%, 30%, 50% e 70%, na posição T6 no teto do conduto	71
Figura 62. Pressões em regime transitório com interrupção para as aberturas de 20%, 40%, 60% e 80%, na posição T6 no teto do conduto	71
Figura 63. Enchimento com interrupção de abertura em 40% - posição T6 teto - velocidade 3,6 mm/s.....	72
Figura 64. Comparativo entre as pressões mínimas na parada e mínimo da amostra na posição T6 teto velocidade 3,6mm/s	74
Figura 65. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para a pressão média.....	75
Figura 66. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para o coeficiente de pressão (CP).....	76
Figura 67. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para a pressão $P_{1\%}$	77
Figura 68. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para o coeficiente de pressão $CP_{1\%}$	78
Figura 69. Relação entre os coeficientes de pressão $CP_{1\%RTP}$ e $CP_{1\%RP}$	80
Figura 70. Diferença entre os coeficientes de pressão CP_{minRTP} e $CP_{1\%RTP}$	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Grandezas em escalas de modelo segundo a semelhança de Froude	25
Tabela 2. Ensaios em regime permanente com transdutor	38
Tabela 3. Ensaios realizados em regime transitório	39
Tabela 4. Ensaios realizados em regime transitório	42
Tabela 5. Comparação entre as pressões mínimas.	73
Tabela 6. Comparativo entre os valores de $CP_{1\%RTP}$ e $CP_{1\%RP}$	79
Tabela 7. Comparativo entre os valores de $CP_{1\%RTP}$ e $CP_{\min}RTP$	81
Tabela 8. Valores de pressão obtidos para a base do conduto em regime transitório com parada	93
Tabela 9. Valores de pressão obtidos para o teto do conduto em regime transitório com parada	94
Tabela 10. Vazões e velocidades do escoamento para o teto e base do conduto em regime transitório com parada.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS

a = abertura da comporta

A_m = parâmetro adimensional

B = largura do conduto

C = celeridade

C_C = coeficiente de contração do escoamento

CP = coeficiente de pressão

CP_{min} = coeficiente de pressão média mínima

CP' = coeficiente de flutuação de pressão

$CP_{1\%}$ = coeficiente de pressão com probabilidade de 1% de não excedência

$CP_{0,1\%}$ = coeficiente de pressão com probabilidade de 0,1% de não excedência

D = diâmetro do conduto para o caso de diâmetro igual em montante e jusante
(altura do conduto)

g = aceleração da gravidade

K = índice de cavitação

L = comprimento característico

P = pressão média

P_A = pressão atmosférica local

P_C = pressão mínima média

P_j = pressão a jusante da comporta

P_U = pressão a montante da comporta

P_v = pressão de vapor da água a temperatura ambiente

$P_{1\%}$ = Pressão com probabilidade de 1% de não excedência

$P_{0,1\%}$ = Pressão com probabilidade de 0,1% de não excedência

P_2 = pressão na seção onde o jato está totalmente expandido

Q = vazão

R_c = relação de carga

V = velocidade de referência

V_c = velocidade na “vena contracta” em função do coeficiente de contração C_c

V_2 = velocidade na seção onde o jato está totalmente expandido

Y_r = menor altura do escoamento na seção a jusante da comporta

Z_v = cota da base do conduto a montante da comporta

Z_2 = cota da base do conduto a jusante da comporta

σ = flutuação de pressão (desvio padrão amostral)

δ = coeficiente Índice de cavitação

γ = peso específico da água

Δh = diferença de pressão entre duas seções distintas do aqueduto

Φ = coeficiente de correção

Ω = coeficiente de correção para pressão mínima

1 INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

Com um grande potencial hidroelétrico, formado por uma extensa rede fluvial, o Brasil é um dos países que mais utiliza hidrelétricas para geração de energia. Muitas vezes a utilização destas estruturas implica na construção de barramentos para que sejam atendidas as quedas de água necessárias para suprir a demanda energética. Esses barramentos provocam uma descontinuidade no leito do rio, tornando trechos navegáveis em não navegáveis, existindo também a possibilidade de transformar trechos não navegáveis em trechos navegáveis. Em vista disto, tramita no Congresso Nacional o Projeto de Lei 209/2007, que poderá tornar obrigatório o uso de ascensores de barcos e navios, as chamadas Eclusas. Assim, esta pesquisa busca apresentar e sugerir técnicas para o projeto das mesmas, buscando maior eficiência e segurança na transposição dos desníveis. O governo brasileiro anunciou que planeja construir 27 eclusas nos próximos cinco anos com a implementação de eclusas em barragens já existentes e também em aproveitamentos hidroelétricos em fases de projeto e execução (BRACIER, 2012).

O estudo em modelos reduzidos de eclusas de navegação iniciou no começo do século XX para suprir as necessidades do rápido crescimento do transporte aquaviário. Atualmente os estudos em modelos reduzidos são ferramentas essenciais para a elaboração de projetos e dimensionamento das estruturas de eclusas de navegação, principalmente no que diz respeito aos sistemas de enchimento e esvaziamento das câmaras de eclusas de alta queda, pois nestas condições ocorrem escoamentos com altas velocidades, que podem vir a provocar grandes flutuações de pressão, com o aparecimento de pressões negativas nocivas à estrutura. Essas condições de escoamento podem provocar danos na estrutura por erosão ou cavitação. É importante salientar que os modelos reduzidos construídos no Brasil são geralmente utilizados apenas em estudos de projetos específicos.

Este estudo está inserido em um projeto de pesquisa e desenvolvimento (Programa de P&D ANEEL) realizado entre Furnas Centrais Elétricas S.A. a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e a Universidade Federal de Minas Gerais, intitulado “Análise do comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação”. Sendo o estudo das pressões a jusante das comportas apenas um dos assuntos do referido P&D.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é avaliar as pressões mínimas a jusante de uma comporta tipo segmento invertida em condutos de eclusas de navegação e desenvolver critérios para a estimativa destas pressões, a partir de estudo em modelo hidráulico reduzido de maneira a orientar os projetos das eclusas e suas leis de operação.

Será dada ênfase ao estudo das pressões extremas mínimas, pois estas são as de maior importância por serem diretamente responsáveis pela possível formação de erosão e cavitação e, conseqüentemente, danos às estruturas dos sistemas de enchimento e esvaziamento das eclusas de navegação.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram desenvolvidas diferentes etapas de atividades com os seguintes objetivos específicos:

- * Implantação de um modelo hidráulico reduzido de uma eclusa de navegação genérica;

- * Verificação da perda de carga na comporta e determinação da curva de descarga da mesma em função de diferentes cargas a montante;

- * Verificação das distribuições de pressão ao longo do conduto a jusante da comporta para diferentes situações de desnível entre montante e jusante em regime permanente e regime transitório;

* Determinação dos pontos de menor pressão nos condutos de enchimento e esvaziamento e para quais situações de escoamentos estes ocorrem, em regime permanente e em regime transitório;

* Determinação de parâmetros adimensionais visando a estimativa das pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida.

* Comparação entre os resultados em regime permanente e em regime transitório.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRICO

As eclusas de navegação são sistemas utilizados por embarcações para a transposição de desníveis, sejam eles naturais ou antropogênicos. Esses sistemas utilizam apenas a força da gravidade para o seu funcionamento, onde o enchimento e esvaziamento são feitos pelo princípio dos vasos comunicantes. Os primeiros sistemas de comportas para transposição de desníveis, segundo registros, são anteriores a era cristã.

As eclusas com câmara surgiram no século XV simultaneamente em três países, mas apenas em 1497, Leonardo da Vinci propõe pela primeira vez o uso de comportas para controle do fluxo de enchimento e esvaziamento.

O Brasil possui um grande potencial hidroviário, contando, com um total de 26.662 km de hidrovias, segundo o Ministério dos Transportes (2010), porém na prática apenas aproximadamente 10.000km de hidrovia são efetivamente utilizados. Este número pode subir para mais de 40.000 km se forem executadas algumas alterações e melhorias na rede hidroviária brasileira.

As principais hidrovias brasileiras são:

- Hidrovia do Madeira;
- Hidrovia do São Francisco;
- Hidrovia Tocantins-Araguaia;
- Hidrovia Paraná-Tietê;
- Hidrovia Paraguai-Paraná.

Dada a extensão territorial do Brasil, bem como seu potencial hidroviário, se pode perceber que o transporte hidroviário ainda ocorre de forma incipiente

quando comparado com o transporte rodoviário; segundo o Ministério dos Transportes (2010), o transporte rodoviário representava 58%, e o transporte aquaviário apenas 13%, da matriz viária brasileira.

Segundo Santos (1993), o Brasil se depara com sérias limitações de expansão de fronteiras agrícolas, dada a insuficiência de corredores ferro-hidroviários. A maioria dos atuais projetos de indução ao desenvolvimento em áreas de expansão de fronteira agrícolas e minerais é de pavimentação ou de reconstrução de rodovias. O transporte por navegação fluvial, se comparado com outros modais, apresenta o menor custo operacional e custo de implantação relativamente baixo, se inseridos em projetos de usos múltiplos.

Cada hidrovia apresenta diferentes condições de navegabilidade, no que diz respeito ao calado, largura da rota de navegação, raios das curvas presentes, presença de corredeiras, cachoeiras, barragens pontes e eclusas, bem como às variações decorrentes do ciclo hidrológico.

A Figura 1 apresenta a Eclusa 1 do sistema de transposição de desnível da usina de Tucuruí, no rio Tocantins, e é um exemplo de eclusa de alta queda com desnível máximo de 36m.



Figura 1. Eclusa 1 de Tucuruí (Fonte: ELETRONORTE, 2011)

2.2. ASPECTOS GERAIS

Neste item serão apresentadas as características gerais de uma eclusa de navegação de alta queda.

Uma eclusa eficiente pode ser definida como aquela que permite que as embarcações façam a transposição dos desníveis de forma rápida e segura.

As eclusas de navegação de alta queda são constituídas basicamente de (USACE, 1975):

Acessos e muros guias - Estas estruturas são encontradas tanto em montante quanto em jusante, e servem para auxiliar a entrada e saída das embarcações da câmara.

Câmara - reservatório onde as embarcações são posicionadas para a transposição do desnível, é limitado em montante e jusante por comportas que permitem a entrada e saída das embarcações e a vedação do reservatório para as mudanças de níveis.

Aquedutos e sistema de distribuição - são tubulações interligadas que possuem comportas para o controle da vazão de enchimento e esvaziamento da câmara.

Na Figura 2 podem-se visualizar esquematicamente alguns componentes e o funcionamento da eclusa de Tucuruí para a transposição do rio Tocantins, partindo de um nível a jusante para um nível a montante, vencendo um desnível total de 72 metros em duas eclusas distintas, ligadas através de um canal de 5,5km de extensão. Esta pode ser citada como umas das principais eclusas de alta queda projetada e construída no Brasil.

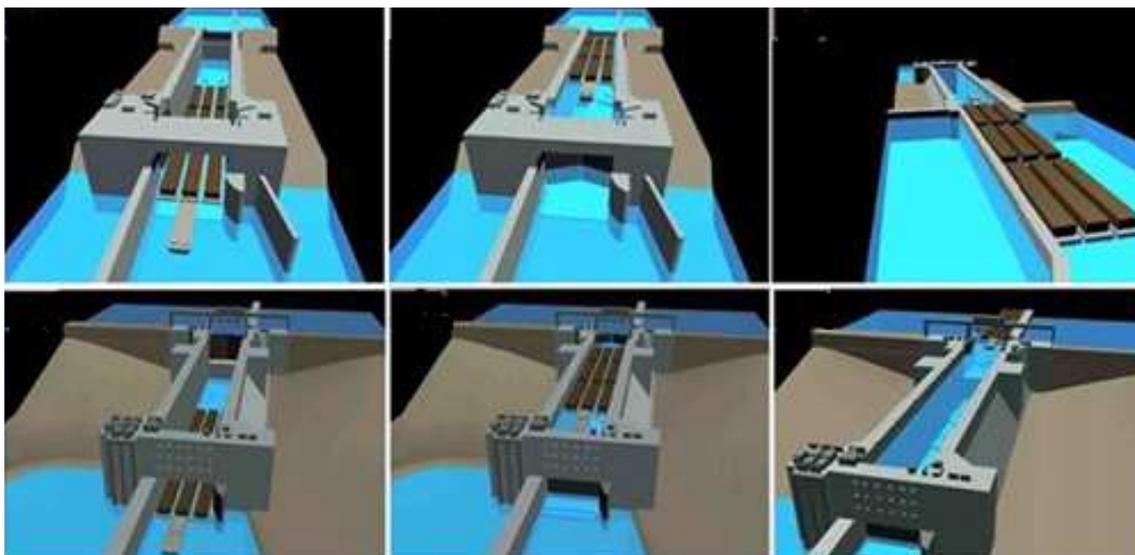


Figura 2. Sequência de eclusagem do sistema de eclusas da usina de Tucuruí (Adaptado de PLEC, 2010)

2.3. CLASSIFICAÇÃO DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

As eclusas de navegação podem ser classificadas principalmente quanto à altura de queda. Esta é definida pela diferença entre o nível de montante e o nível de jusante dos planos de água. (Davis & Murphy, 1966):

- Eclusas de baixa queda: com desnível de até 10m;

Neste tipo de eclusa podem ser encontrados muitos casos onde o enchimento é feito de forma frontal ou por porta basculante, de acionamento vertical.

- Eclusas de média queda: com desnível entre 10m e 15m;

Geralmente em eclusas de média queda, o enchimento é feito pelo sistema de portas laterais ou de Manifolds ao longo da câmara. Esse tipo de enchimento foi objeto de vários estudos de modelos reduzidos, e seu sucesso está na ausência de ondas estacionárias e na turbulência local dos jatos.

- Eclusas de alta queda: com desnível superior a 15m.

Eclusas de alta queda requerem sistemas de enchimento hidrodinamicamente balanceados, estes sistemas têm alta complexidade e devem ser estudados em modelos físicos e numéricos. No Brasil é comum que

as eclusas sejam instaladas em barramentos onde a principal atividade seja a geração de energia elétrica, isto faz com que as quedas a serem superadas sejam geralmente altas. A Figura 3 apresenta a eclusa de alta queda localizada na usina de Tucuruí no Rio Tocantins – PA.



Figura 3. Eclusa de alta queda – Tucuruí – PA (Fonte: ELETRONORTE, 2011)

2.4. PROBLEMAS HIDRÁULICOS EM ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

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

O primeiro está relacionado às condições de amarração na câmara da eclusa. A fim de satisfazer os critérios de amarração das embarcações, a movimentação da superfície de água na câmara da eclusa deve ser uniforme, exigindo, para tanto, um sistema de enchimento e esvaziamento hidrodinamicamente balanceado.

O segundo se refere aos problemas hidráulicos encontrados junto às comportas. O grande diferencial de pressão entre as faces das comportas e o

curto período exigido para as operações declusagem incorrem em velocidades muito altas, as quais produzem não somente cavitação, mas exigem um cuidado especial no projeto estrutural das comportas (QINQIN, 2005).

O sistema de distribuição hidrodinamicamente balanceado se caracteriza por dispor de derivações providas de orifícios localizados longitudinalmente no fundo da câmara. As bifurcações e desdobramentos dos aquedutos são projetados de forma a se obter uma distribuição de vazão bastante equilibrada, visando à tranquilidade da superfície de água dentro da câmara. O atual estágio de evolução dos sistemas de distribuição torna difícil imaginar novas concepções revolucionárias para esses sistemas, contudo, esperam-se soluções para a grande variedade de problemas específicos que afetam as eclusas de alta queda (USSAMI, 1980).

Ussami (1980) cita três estágios envolvidos no processo de enchimento de uma eclusa de navegação. O primeiro estágio, que corresponde ao início do enchimento da câmara, é o mais crítico, pois é neste estágio onde o nível d'água no interior da câmara é menor e têm-se as maiores velocidades de escoamento, conseqüentemente, maior probabilidade de ocorrência do fenômeno de cavitação. No segundo estágio, tem-se escoamento em regime quase permanente, não sendo observados grandes problemas. O último estágio ocorre no final do processo de enchimento, quando o efeito de inércia da massa de fluido em movimento tem a tendência de encher a câmara acima do nível desejado.

Tondowski (1987) afirma que os principais fenômenos turbulentos são a cavitação, o descolamento do escoamento em curvas, os vórtices na tomada d'água e o eventual ressalto hidráulico na restituição. Os prováveis efeitos do escoamento turbulento poderão ser erosão por cavitação e vibrações nas comportas.

Santos (1998) cita, ainda, outros problemas hidráulicos, tais como:

- vibração nas comportas devido a grandes flutuações de pressão;
- esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação;

- ampliação dos esforços ligados aos fenômenos de downpull e uplift, fenômenos que se referem ao empuxo descendente e ascendente, respectivamente.

Citando também a cavitação como o mais importante dos fenômenos turbulentos decorrentes do escoamento, pois além de ser altamente agressiva às estruturas sob sua ação, é a origem das demais questões mencionadas.

2.5. COMPORTAS EM ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

Inicialmente, nas eclusas de navegação utilizavam-se comportas tipo vagão para o controle do escoamento de enchimento e esvaziamento da câmara, porém com a evolução dos estudos hidráulicos, estas começaram a ser substituídas por comportas tipo segmento. (Figura 4)



Figura 4. Comportas tipo segmento instalada em vertedor.(USACE, 2010)

As razões da utilização das comportas do tipo segmento são principalmente a maior facilidade de acionamento devido à diminuição dos

efeitos de atrito, além da ocorrência de menos vibrações devido à geometria das mesmas. (Dourado, 1986).

Quando se iniciou o uso de comportas do tipo segmento, elas eram instaladas da forma convencional, ou seja, o eixo de giro situado à jusante. Investigações efetuadas no modelo reduzido da Eclusa de Pickwick (EUA) demonstraram que grandes quantidades de ar eram arrastadas para o interior da câmara, causando perturbações na superfície da água e colocando em risco as embarcações. Esse problema foi resolvido invertendo-se a posição da comporta, colocando o eixo de giro para montante. (USSAMI, 1980).

Atualmente as comportas mais utilizadas em condutos de eclusas de navegação são as comportas do tipo segmento invertida, segundo Davis (1989), todas as eclusas construídas nos Estados Unidos após 1940 foram com comportas do tipo segmento invertida.

A Figura 5 mostra a instalação e os componentes básicos de uma comporta tipo segmento invertida em um conduto de enchimento/esvaziamento de eclusa de navegação.

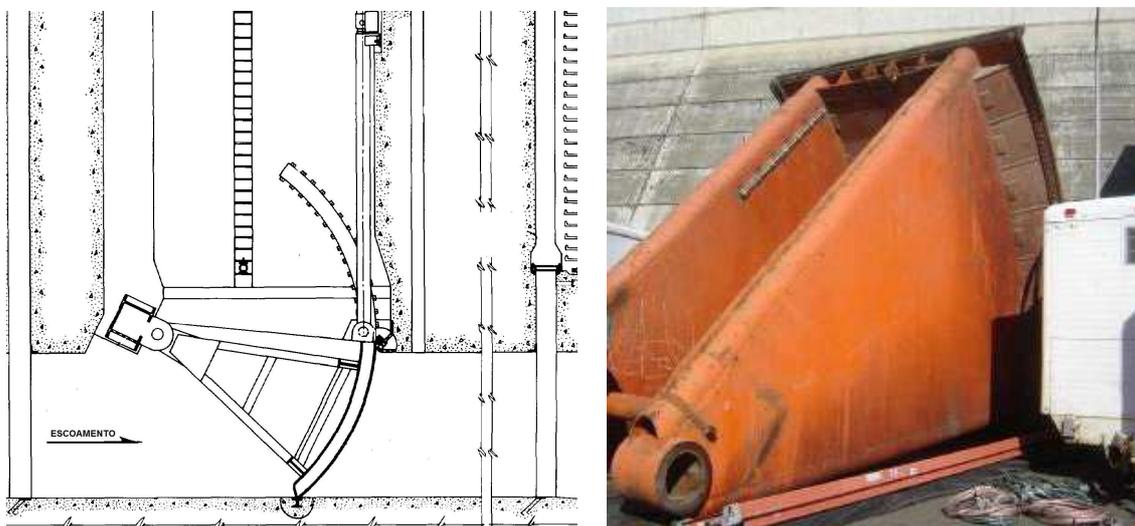


Figura 5. Comporta tipo segmento invertida (adaptado de USACE, 1975)

2.6. ESCOAMENTO SOB COMPORTAS

Nos escoamentos sob comporta ocorre uma contração no fluxo formando um jato semelhante aos escoamentos em orifícios, tornando a seção útil do escoamento menor e, conseqüentemente, aumentando as velocidades; este fenômeno é conhecido como “vena contracta”. A relação entre a “vena contracta” e a abertura da comporta é chamada de coeficiente de contração, cujo valor depende do grau de abertura da comporta e de suas características geométricas. A grande maioria das investigações em comportas tipo segmento invertida mostram coeficientes de contração na faixa entre 0,65 e 0,90. O coeficiente de contração do escoamento sob comportas pode ser calculado pela equação:

$$C_c = \frac{Y_r}{a} \quad \text{equação 1}$$

onde:

Y_r = menor altura do escoamento na seção a jusante da comporta;

a = abertura da comporta.

Na Figura 6 mostram-se esquematicamente os parâmetros utilizados para o cálculo do coeficiente de contração do escoamento sob comportas.

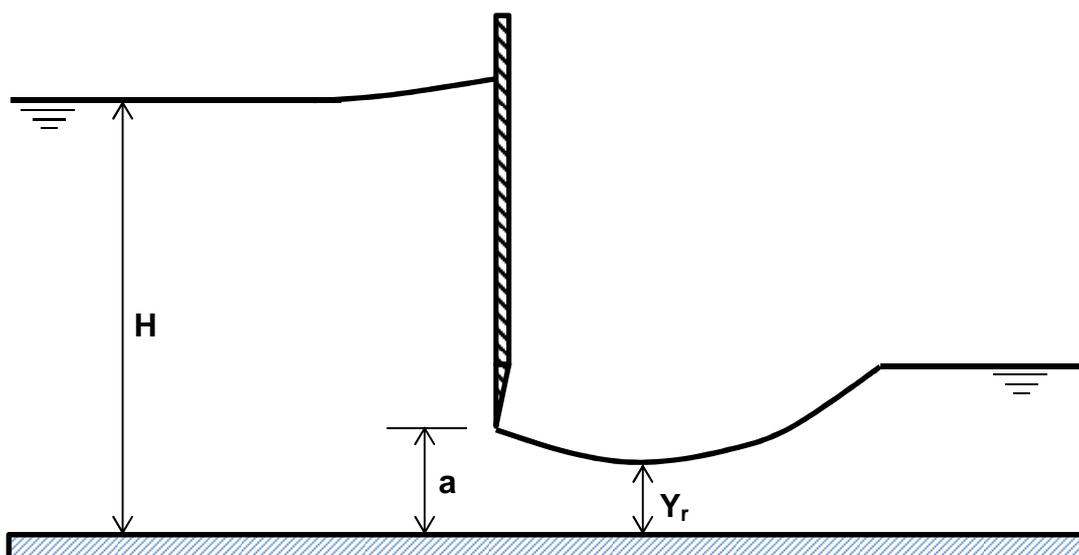


Figura 6. Parâmetros do escoamento a jusante de uma comporta (Adaptado de LIN et al. 2002)

Na Figura 7 pode-se visualizar a “vena contracta” a jusante da comporta do modelo reduzido construído no LAHE.

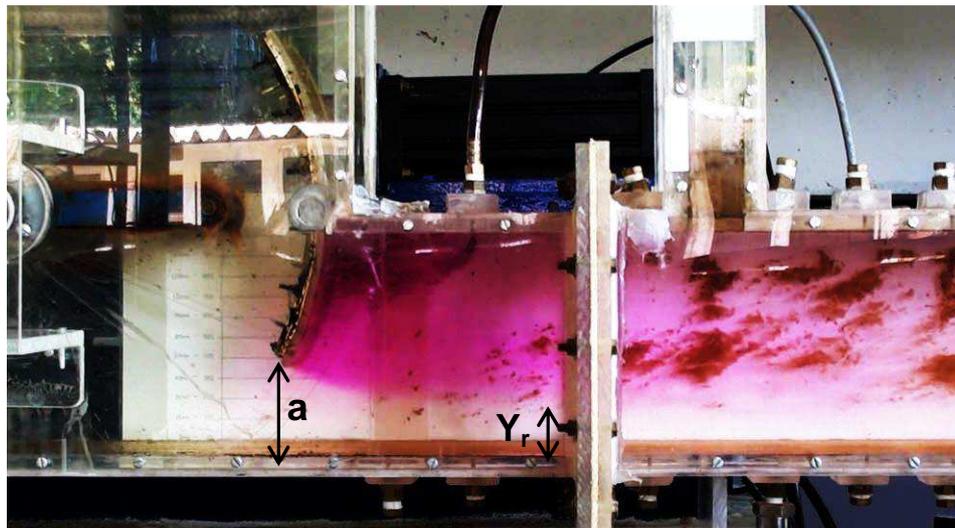


Figura 7. Visualização da “vena contracta” com injeção de corante para a abertura de 40%

Sharma (1976) classifica os escoamentos em condutos horizontais a jusante de comportas em seis diferentes tipos (Figura 8):

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

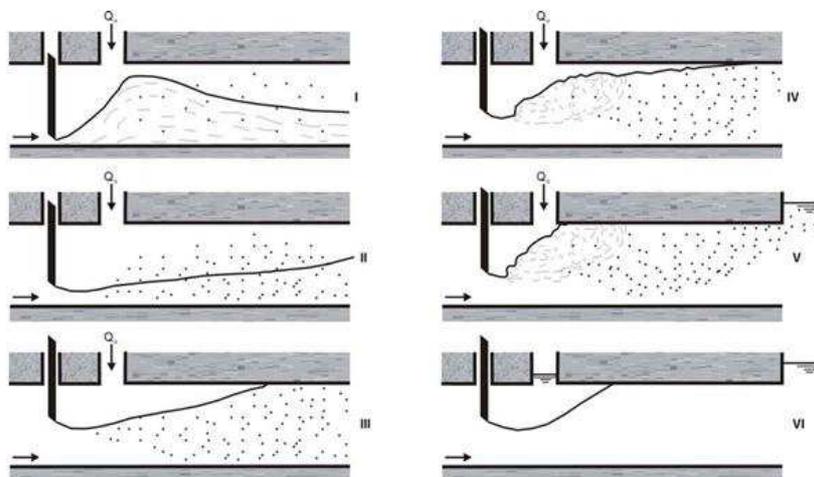


Figura 8. Tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos (BATTISTON apud SHARMA, 1976)

Os escoamentos de I a IV são escoamentos com superfície livre e incorporam grande quantidade de ar. O escoamento do tipo V, ressalto com o escoamento em carga, representa o caso de comportas de controle de vazão em eclusas quando nestas existe sistema de aeração. O caso VI representa o ressalto hidráulico afogado onde não há demanda de ar, neste caso é possível fazer uma analogia com o escoamento a jusante de comportas de eclusas.

Segundo Battiston (2008), em escoamentos a jusante das comportas sem aeração, este pode ser tratado como um jato parietal confinado. A camada de mistura do jato retira massa da região confinada entre a camada de mistura e o teto do conduto, contribuindo para a redução da pressão média a jusante das comportas e aumentando o potencial de cavitação. Podem-se citar quatro regiões onde o escoamento pode ocasionar baixas pressões (Figura 9):

- o ponto em que o escoamento descola da comporta, ou de outra irregularidade das paredes do conduto;
- o centro do jato de alta velocidade e em expansão;
- o centro do vórtice de recirculação;
- a zona entre o teto do conduto e a camada de mistura do jato.

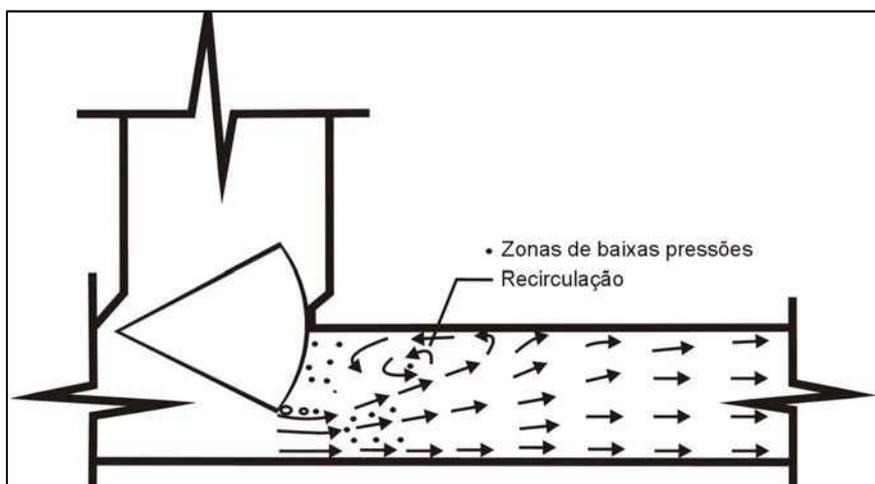


Figura 9. Pontos de baixas pressões em escoamentos sob comportas de eclusas. (BATTISTON, 2008)

2.7. ESTUDO DAS PRESSÕES A JUSANTE DE COMPORTAS

Os ensaios de pressão em eclusas de navegação podem ser realizados basicamente de dois tipos, ensaios com escoamento em regime permanente e ensaios com escoamento em regime transitório. Sabe-se que o escoamento em eclusas ocorre em regime transitório, porém utilizam-se levantamentos de pressão em regime permanente para se conhecer alguns parâmetros complementares ao do regime transitório. Os pontos mais críticos para as pressões normalmente são aqueles situados a jusante de comportas e nas curvas. Para a medição dessas pressões utilizam-se normalmente piezômetros para registro de pressões médias e transdutores de pressão para registro de pressões instantâneas (BRIGHETTI & DOURADO, 1988).

As medições de pressões são importantes para aferição das perdas de cargas ao longo dos circuitos hidráulicos, o que posteriormente pode ser utilizado em modelos matemáticos. Também, são importantes para o projeto estrutural, pois dão informações sobre esforços na estrutura para possíveis pontos que necessitem de proteção especial, como curvas, ranhuras de stop log, etc. No caso de escoamentos turbulentos com grandes flutuações de pressão, deve-se avaliar a pressão média com grande precisão, isto deve ser feito com piezômetros com um pequeno orifício no ponto de medição. No caso de medição de baixas pressões, deve-se tomar cuidado com a distância entre o quadro e o ponto de medição, pois a resistência do tubo deve ser superada rapidamente. (DOURADO, 1986)

É fundamental o detalhamento e densificação dos pontos de medição de pressão na região das comportas, pois durante o período de abertura é a região mais solicitada do circuito hidráulico. Nesses pontos verificam-se as maiores probabilidades de ocorrência de cavitação. O estudo das pressões deve ser realizado para todas as situações de níveis operacionais possíveis, pois isso será importante na definição da submergência das comportas (OLIVEIRA, et al. 1983).

Brighetti e Dourado (1988) afirmam que o estudo das pressões deve ser associado ao tempo de eclusagem, esforços nas amarras e também com as

condições de escoamento nas estruturas de alimentação e descarga. Para leis lineares de manobras das comportas, os estudos de pressões mínimas devem se concentrar em aberturas variando de 40% a 60%, pois nestas aberturas encontram-se os menores índices de cavitação. Observa-se também comparando-se pressões para diferentes tempos de manobra, que as menores pressões diminuem ainda mais com o aumento do tempo de abertura das comportas.

Mees et al. (2008) comparam o escoamento sob uma comporta segmento invertida com um ressalto hidráulico. No estudo foram comparadas as aberturas de comporta de 10% e 30% com números de Froude variando de 1,4 a 10,3 com os valores encontrados na literatura, como Marques (1995), Pinheiro (1995), Endres (1990) e Trierweiler (2006). É possível verificar que existe uma analogia entre os escoamentos a jusante de comportas e o ressalto hidráulico a superfície livre, porém pode-se observar que o escoamento no conduto gera pressões significativamente menores, maior flutuação de pressão e menor perda de energia (Figura 10).

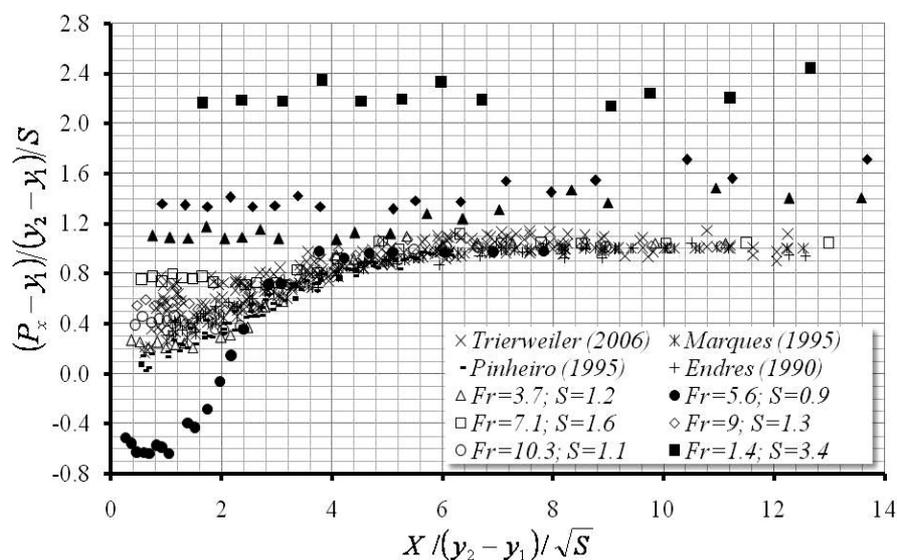


Figura 10. Comparação de pressões médias adimensionais (MEES et al. 2008).

A Figura 11 demonstra esquematicamente a analogia entre o ressalto hidráulico livre e o escoamento a jusante de comportas em condutos sob pressão.

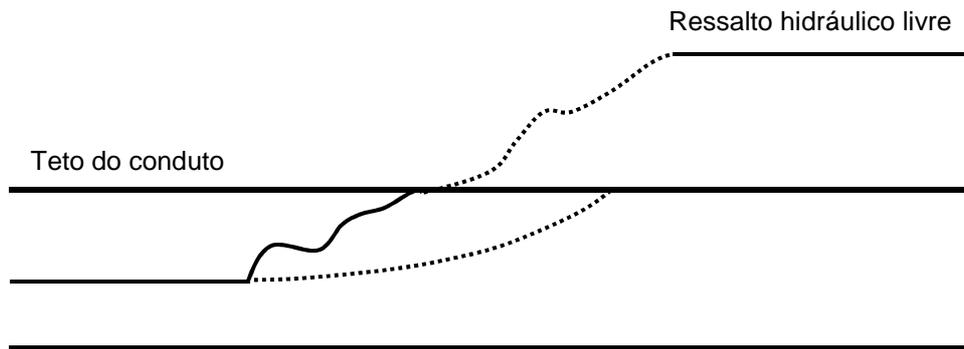


Figura 11. Limite superior do ressalto hidráulico e teto do conduto (Adaptado de SMITH & CHEN, 1989)

2.8. DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO MÍNIMA

A pressão média mínima (P_C) na sessão contraída do jato a jusante da comporta pode ser determinada pelas equações da continuidade e de Bernoulli com base na pressão média na sessão onde o jato já está totalmente expandido (USSAMI et al. 1983 b):

$$\frac{P_C}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + (Z_2 - Z_V) + (D - C_C a) + \left[1 - \left(\frac{1}{C_C \frac{a}{D}} \right) \right] \frac{V_2^2}{g} \quad \text{equação 2}$$

onde:

P_C = pressão média mínima;

P_2 = pressão na seção onde o jato está totalmente expandido;

γ = peso específico da água;

Z_V = cota da base do conduto a montante da comporta;

Z_2 = cota da base do conduto a jusante da comporta;

D = diâmetro do conduto para o caso de diâmetro igual em montante e jusante;

C_C = coeficiente de contração do jato;

a = abertura da comporta;

V_2 = velocidade na seção onde o jato está totalmente expandido;

Admitindo a distribuição linear das pressões na região de recirculação entre a “vena contracta” e o teto do conduto, pode-se determinar a pressão mínima média no teto do aqueduto (P_r) a jusante da comporta, através da seguinte equação (USSAMI et al. 1983 b):

$$\frac{P_r}{\gamma} = \frac{P_c}{\gamma} - (D - C_c a) \quad \text{equação 3}$$

A Figura 12 apresenta esquematicamente as linhas de energia e piezométrica média no caso de escoamento sob comporta segmento invertida, assim como outros parâmetros relevantes para o cálculo das pressões na seção a jusante da comporta.

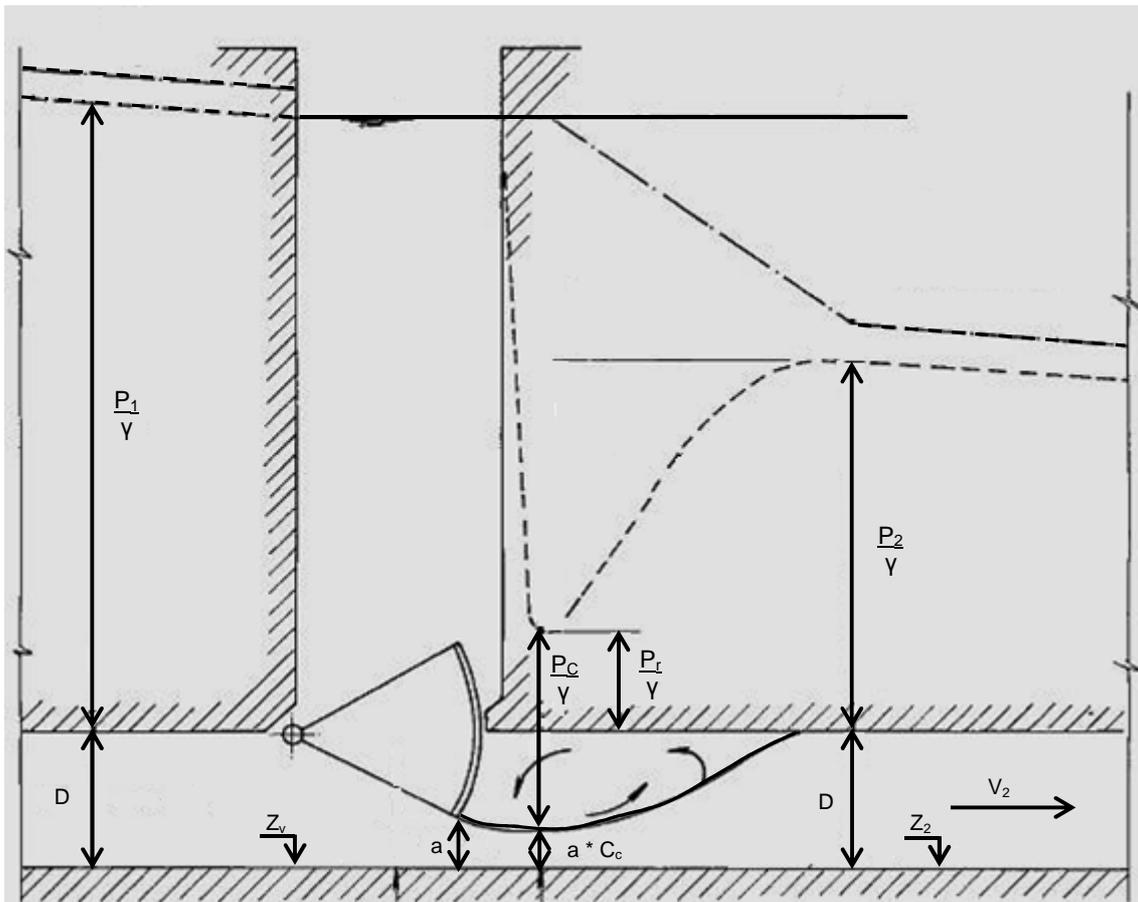


Figura 12. Linha de energia e piezométrica. (adaptado de USSAMI et al. 1983 b)

2.9. CAVITAÇÃO

Cavitação é um fenômeno que ocorre quando a pressão local à temperatura ambiente em um líquido torna-se igual à pressão de vapor desse líquido, formando-se então bolhas de vapor que são carregadas pelo escoamento (DOURADO, 1986). Quando estas bolhas chegam em regiões de escoamento onde a pressão local é maior que a pressão de vapor, elas tornam-se instáveis e implodem. O colapso dessas bolhas origina pressões locais elevadas, as quais geram ruídos, flutuações de pressão, vibrações, podendo ocasionar erosão das superfícies sólidas.

Diversos fatores, tais como: condições geométricas, flutuações de pressão quantidade de partículas ou gás dissolvido no escoamento, gradientes de pressão acentuados, pressão média, velocidades e acelerações locais, influenciam na formação da cavitação (GONTIJO & CAMPOS, 2005). Devido às características dinâmicas da cavitação, o fenômeno está diretamente relacionado a escoamentos de líquidos em alta velocidade e, conseqüentemente, a baixas pressões. A Figura 13 apresenta três formas de bolhas de cavitação e seus ciclos de desenvolvimento até o seu colapso.

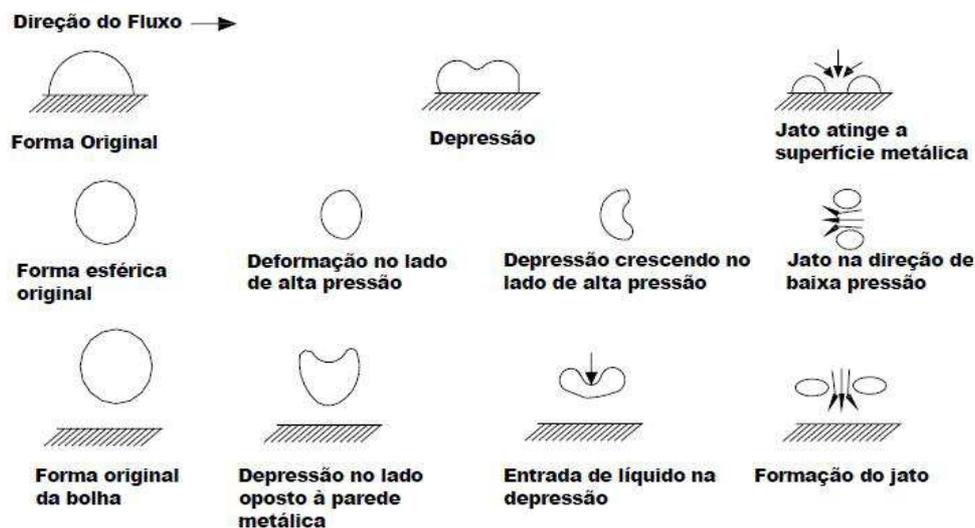


Figura 13. Três formas de implosão das bolhas de cavitação (GREIN & WYSS, 1974)

As bolhas de vapor quando formadas têm um ciclo entre sua formação e implosão, de milésimos de segundos, podendo atingir altas frequências e

pressões da ordem de 1000 atm (KNAPP et al. 1970). Quando o colapso das bolhas de vapor ocorre muito próximo das paredes das comportas de controle ou dos condutos, estas estruturas estão sujeitas a severa erosão de sua superfície (TULLIS & MARSCHNER, 1968)

Segundo Tullis (1982), a cavitação pode ser classificada em dois tipos: gasosa e vaporosa.

A cavitação gasosa é formada quando há ar suspenso no escoamento; sendo um processo suficientemente lento, permitindo o aumento da quantidade de ar incorporado na massa líquida. Devido a esse aumento gradativo de volume de ar, os rompimentos das bolhas acontecem de forma lenta, fazendo com que a cavitação gasosa não seja tão agressiva.

Já a cavitação vaporosa ocorre quando não há ar no interior do fluxo de água, e no interior das bolhas há somente vapor. Nesse caso, as pressões geradas pelo rompimento das bolhas são elevadas, causando danos às estruturas hidráulicas, tais como: ruídos, vibrações, flutuações de pressão, danos causados por erosão e perda de eficiência hidráulica.

2.9.1. Cavitação em eclusas de navegação

Nos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação de alta queda, um dos problemas mais relevantes é a cavitação a jusante das comportas. Gontijo & Campos (2005) salientam que nas eclusas de navegação, os problemas decorrentes da cavitação são mais graves a jusante das comportas controladoras de vazão. Esse fator, segundo Brighetti & Dourado (1988), tem sido a maior limitação para o aumento da altura da queda das eclusas. A cavitação em superfícies de concreto não é tão documentada quanto a cavitação em superfícies metálicas, porém o desenvolvimento da erosão é semelhante. A deterioração da superfície ocorre rapidamente após o início da exposição ao fenômeno, causando uma aparência áspera e esburacada. A repetição dos esforços causados pela cavitação provocam a deterioração do material e o descolamento de pequenos pedaços, criando irregularidades na superfície.

Segundo USACE (1975), duas medidas são tomadas como principal precaução para o problema de cavitação:

- Controle das pressões a jusante das comportas para que sejam sempre positivas. Esta medida tem sido mais adequada para eclusas de baixa e média queda. Em eclusas de alta queda, para que as pressões a jusante das comportas sejam mantidas positivas, é necessário o rebaixamento excessivo dos poços das comportas.

- Injeção controlada de ar, fazendo com que pressões negativas entre -3 e -6 metros de coluna d'água induzam a uma aeração natural do escoamento. Esta prática, apesar de eficaz para o problema da cavitação, pode gerar significativas oscilações no nível d'água no interior da câmara da eclusa.

2.9.2. Índice de cavitação a jusante da comporta

USACE (1975), faz referências a observações realizadas na Eclusa de John Day (EUA), e ao índice de cavitação dado pela seguinte equação:

$$\delta = \frac{P + (P_A - P_V)}{\frac{V_c}{2g}} \quad \text{equação 4}$$

onde:

P – pressão na “vena contracta” a jusante da comporta em sua face (esta posição varia com a abertura);

P_A – pressão atmosférica local;

P_V – pressão de vapor da água a temperatura ambiente;

g – aceleração da gravidade;

V_c – velocidade na “vena contracta” em função do coeficiente de contração C_C .

O índice de cavitação é o primeiro indicativo utilizado para se verificar a possibilidade da existência de cavitação. Para aquedutos prismáticos com seção na comporta igual à dimensão do aqueduto, tem se recomendado o valor de $\delta = 1$ como crítico (DOURADO, 1986).

Santos (1998) apresenta um índice de cavitação K , o qual leva em consideração apenas as pressões do sistema, este pode ser expresso pela equação:

$$K = \frac{P_j - P_v}{P_u - P_j} \quad \text{equação 5}$$

onde:

P_j - pressão a jusante da comporta;

P_v - pressão relativa de vapor do fluido;

P_u - pressão a montante da comporta.

Para comportas tipo segmento invertida, realizaram-se estudos na eclusa de John Day (EUA), onde se adotou, para limite inferior do índice de cavitação (Figura 14), o valor de 0,4 para abertura de 30%, e 0,6, para 60%, sendo linear entre estas aberturas; abaixo desses valores existe risco de cavitação (BRIGHETTI & DOURADO, 1988).

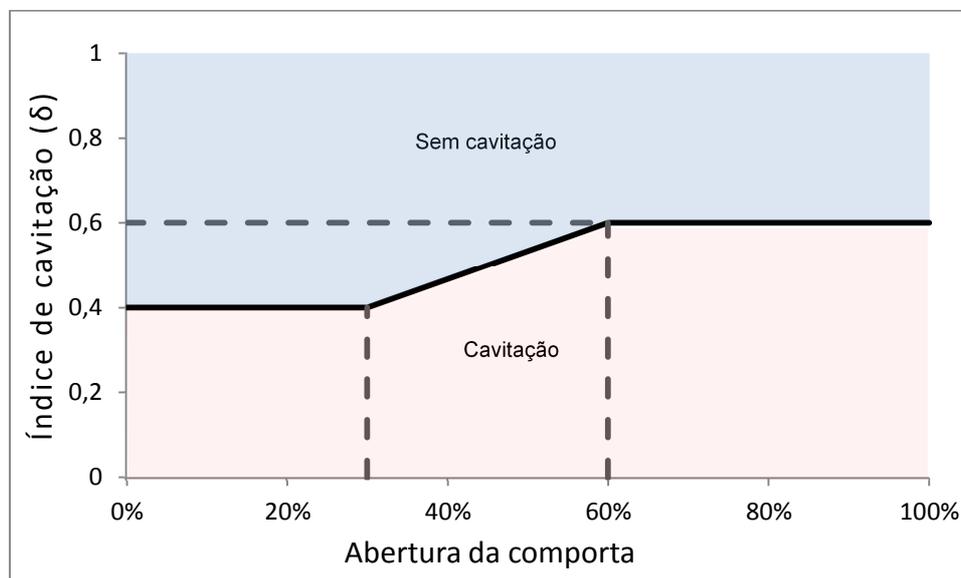


Figura 14. Índice de cavitação para comporta de segmento invertida (Adaptado de BRIGHETTI & DOURADO, 1988)

Estudos realizados no Laboratório da Sogreah na França (DOURADO, 1986), definiram duas curvas de valores limites do índice de cavitação para

comportas tipo vagão (Figura 15). Nesta Figura podem-se observar três condições distintas para o índice de cavitação:

- a área situada acima da curva de início da cavitação indica que não há risco de cavitação;
- a área entre a curva de início da cavitação e a curva de cavitação caracterizada indica que existem altas probabilidades de início de cavitação;
- a área abaixo da curva de cavitação caracterizada indica altas probabilidades de cavitação.

É importante salientar que o estudo da cavitação em modelo reduzido é apenas um indicativo para que se possa inferir que a cavitação ocorrerá no protótipo.

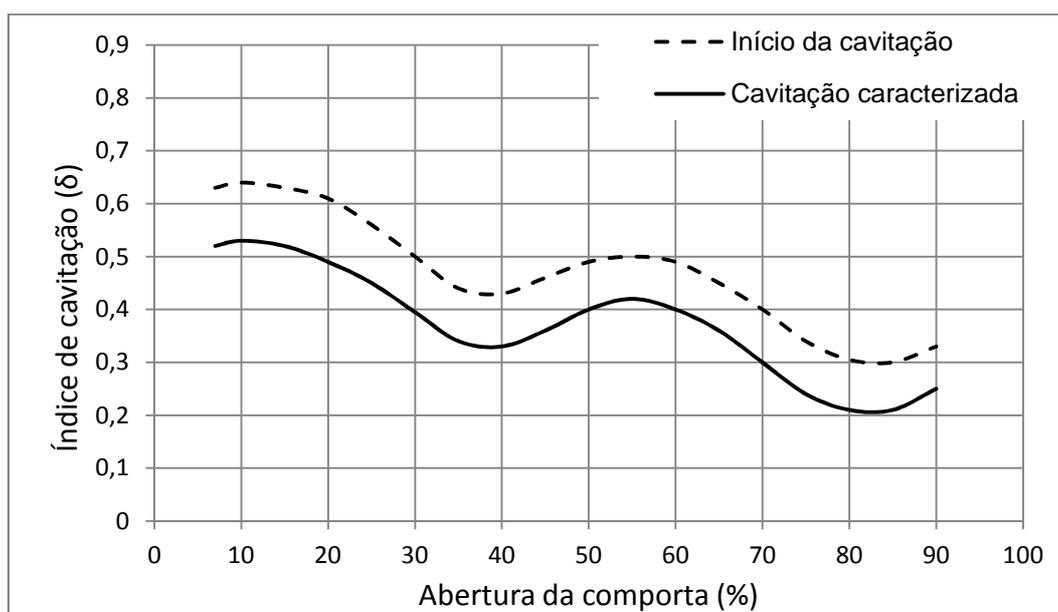


Figura 15. Critério para cavitação em comporta tipo vagão (DOURADO, 1986).

Kempka (2011) compara os valores dos índices de cavitação para comporta plana com os valores calculados para comporta tipo segmento invertida através de estudos em modelo reduzido. (Figura 16).

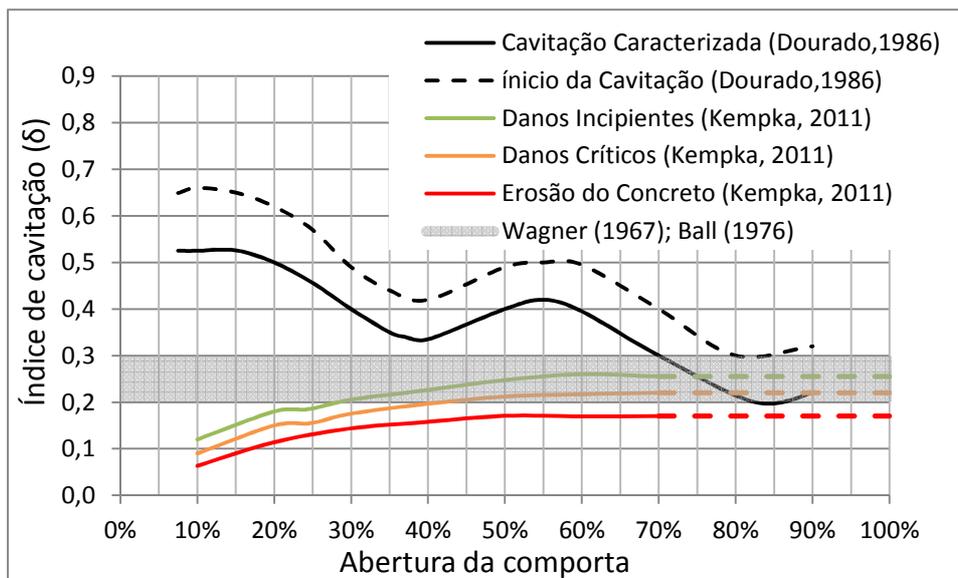


Figura 16. Comparação dos valores de δ para comportas tipo segmento invertida (IPH) com os valores de δ para comportas tipo vagão (KEMPKA, 2011)

A Figura 17 demonstra que os índices de cavitação de Kempka (2011) para comportas tipo segmento invertida estão dentro da faixa apresentada por Khatsuria (2005).

Estrutura ou tipo de Irregularidade	$\bar{\delta}$	Referência
Túnel de entrada (<i>Tunnel Inlet</i>)	1.5	Tullis (1981)
Expansão súbita em túnel (<i>Sudden expansion in tunnel</i>)	1.0 - 0.19	Russel (1967); Rouse (1966)
Estruturas Defletoras (<i>Baffle pier</i>)		
forma piramidal (<i>Piramidal shape</i>)	1.4 - 2.3	
triangular (<i>triangular USBR basin III</i>)	0.33	Khatsuria (2000)
blocos defletores (<i>T - shaped baffle blocks</i>)	0.68	Kuttiammu (1951)
vertedouro (<i>spillway surfaces</i>)	0.2	Falvey (1982)
comportas e <i>stoplogs</i> (<i>gates and gates slots</i>)	0.2 - 0.3	Wagner (1967)
Concreto Abrasivo - 20 mm de rugosidade (<i>Abraded concrete - 20 mm max depth of roughness</i>)	0.6	Ball (1976)
Soleira Terminal (<i>end sills of stilling basins</i>)	1.05 - 1.75	-
Jatos dissipadores (<i>Jet splitters</i>)	0.15 - 0.70	-

Figura 17. Valores de $\bar{\delta}$ (índice de cavitação) para início dos danos (adaptado de KHATSURIA, 2005).

Cabe salientar que considera-se em estruturas hidráulicas que o concreto resista a esforços de tração máximos da ordem de -6 m.c.a (SENTÜRK, 1994).

2.10. CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA EM MODELOS

REDUZIDOS

Segundo Ussami et al. (1983 a), os sistema de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação estão sujeitos a dois tipos de escoamento:

- Escoamento a superfície livre – neste caso, a lei de semelhança que rege o escoamento é a lei de semelhança de Froude (Tabela 1). A razão entre as forças inerciais do modelo reduzido devem ser iguais a do protótipo, porém deve-se observar para que não haja interferência das forças viscosas e da tensão superficial. A equação abaixo mostra a relação entre as grandezas para a semelhança de Froude:

$$\left[\frac{V}{\sqrt{gL}} \right]_{\text{modelo}} = \left[\frac{V}{\sqrt{gL}} \right]_{\text{protótipo}} \quad \text{equação 6}$$

onde:

V = velocidade de referência;

L = comprimento característico;

g = aceleração da gravidade.

Tabela 1. Grandezas em escalas de modelo segundo a semelhança de Foude

Grandeza	Dimensão	Escala
Comprimento	[L]	λ
Massa	[M]	λ^3
Tempo	[T]	$\lambda^{0,5}$
Área	[L ²]	λ^2
Volume	[L ³]	λ^3
Velocidade	[LT ⁻¹]	$\lambda^{0,5}$
Vazão	[L ³ T ⁻¹]	$\lambda^{2,5}$
Aceleração	[LT ⁻²]	1
Força	[MLT ⁻²]	λ^3

- Escoamento em conduto forçado – nesta situação é utilizada a lei de semelhança de Euler, que é a razão entre as forças devidas à pressão e as

forças de inércia do fluido, também conhecido como coeficiente de pressão, como indicado na equação a seguir:

$$\left[\frac{\Delta h}{V^2} \right]_{\text{modelo}} = \left[\frac{\Delta h}{V^2} \right]_{\text{protótipo}} \quad \text{equação 7}$$

onde

Δh = diferença de pressão entre duas seções distintas do aqueduto;

Nos dois casos há necessidade de imposição de um número de Reynolds limite, isto é:

$$Re_{\text{modelo}} > Re_{\text{limite}}$$

3. METODOLOGIA E INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a caracterização das distribuições de pressão nos condutos a jusante das comportas de enchimento e esgotamento de uma eclusa de navegação, faz-se necessário o uso de modelos físicos hidráulicos. Com isso, é possível simular situações operacionais usuais e também situações extremas de funcionamento dos sistemas através de estudos experimentais. Esses estudos fornecem parâmetros para a confirmação de critérios teóricos e, posteriormente, para a definição de metodologias de análise de parâmetros adimensionais que possam levar ao melhor entendimento dos fenômenos envolvidos.

A jusante das comportas de eclusas ocorrem escoamentos altamente turbulentos e de grande complexidade. A fim de conhecer melhor estes escoamentos, as zonas de menor pressão, a distribuição longitudinal das pressões no teto e na base, o comportamento das flutuações de pressão e pressões extremas ($P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$), foram conduzidos ensaios em regimes permanente e transitório em um modelo experimental, onde foram medidas pressões instantâneas e médias para diferentes condições de escoamento (vazões e abertura da comporta), para a caracterização completa dos fenômenos envolvidos na operação de uma eclusa de navegação.

3.1. MODELO EXPERIMENTAL

O projeto do modelo físico reduzido teve como ponto de partida estruturas de eclusas de alta queda representativas dos projetos de aproveitamentos hidrelétricos no Brasil, em especial aqueles a serem implantados na bacia do rio Amazonas.

Para esta pesquisa foi utilizado um modelo experimental instalado no Laboratório de Hidráulica Experimental LAHE/FURNAS, construído na escala 1:25 e que possui as características básicas de uma eclusa de navegação de alta queda. Essa estrutura foi concebida a partir do conhecimento que se tem

acerca dos sistemas de enchimento e esvaziamento hidraulicamente balanceados. Utilizou-se para a concepção do projeto parâmetros das eclusas da UHE Tucuruí e do estudo de viabilidade da AHE Santo Antônio, a partir dos quais foram efetuadas adaptações, de forma a conceber um projeto representativo das necessidades de altura de queda e tamanho de comboios utilizados nas hidrovias brasileiras.

O arranjo geral da instalação experimental está apresentado na Figura 18.

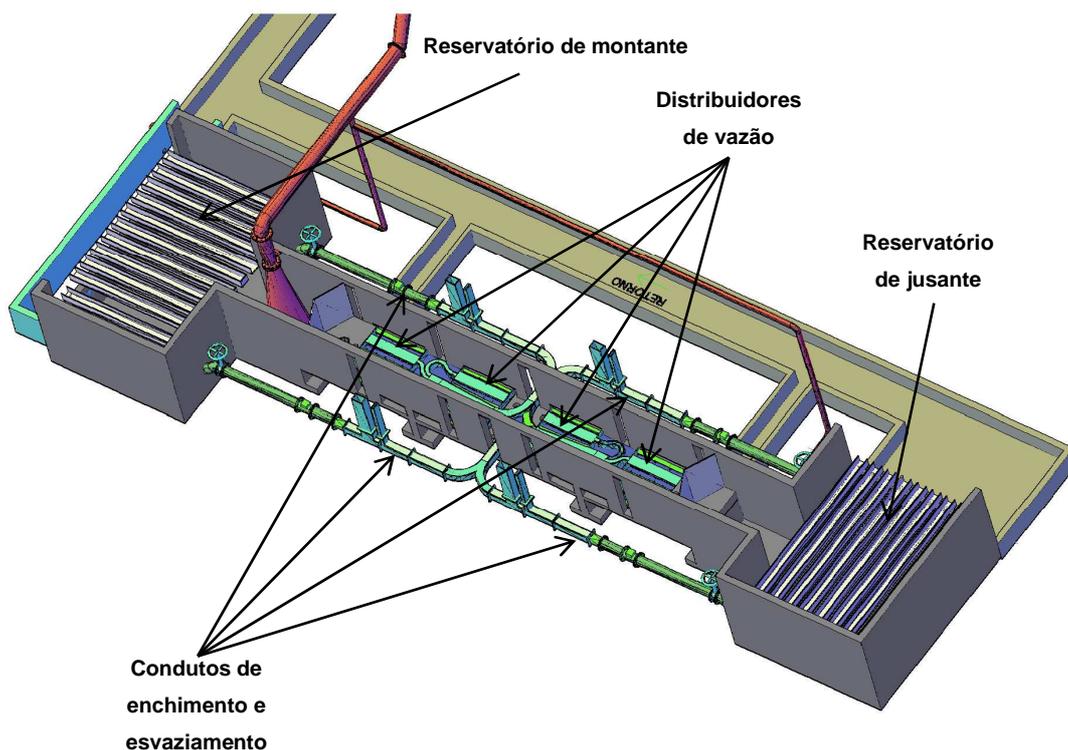


Figura 18. Arranjo geral do modelo reduzido - escala 1:25

O sistema, ilustrado pela Figura 19, é composto de uma câmara de eclusagem de 9,2 metros de comprimento e 1,36 metros de largura. Esta câmara está ligada aos condutos de enchimento e esvaziamento por um sistema de distribuição hidraulicamente balanceado, composto por 176 saídas distribuidoras de vazão (“manifolds”), que distribuem a vazão uniformemente dentro da câmara. A alimentação do sistema é feita por um reservatório de nível constante que é abastecido por 6 bombas com capacidade de 150 l/s cada, o qual abastece o reservatório de montante da eclusa, que conduz as vazões aos condutos de enchimento. Os reservatórios de montante e jusante são de nível constante e possuem um sistema de calhas móveis para

possibilitar a variação da carga hidráulica nas manobras de enchimento e esvaziamento da câmara da eclusa. A restituição da água é feita por um canal de concreto que conduz as vazões excedentes do reservatório de jusante para o sistema de bombeamento.



Figura 19. Instalação experimental

Os aquedutos de enchimento e esvaziamento assim como o sistema de distribuição hidrodinamicamente balanceado foram construídos em acrílico a fim de possibilitar a visualização do escoamento e também facilitar a retirada de possíveis bolsões de ar acumulados no interior da estrutura (Figura 20).



Figura 20. Detalhes das estruturas construídas em acrílico no modelo reduzido

O sistema está dotado de 4 medidores eletromagnéticos de vazão, instalados nos aquedutos de enchimento, e 2 nos aquedutos de esvaziamento, com diâmetro de 200mm e saídas digitais de 4mA a 20mA, que são utilizadas para a aquisição dos dados medidos instantaneamente.

A Figura 21 ilustra os medidores de vazão instalados nos condutos e o respectivo painel de leitura e visualização das vazões instantâneas.



Figura 21. Detalhes do medidor de vazão e painel de visualização

As pressões médias foram registradas com a utilização de piezômetros instalados a jusante da comporta, tanto na base como no teto da tubulação. A Figura 22 ilustra o quadro piezométrico utilizados nas medições.

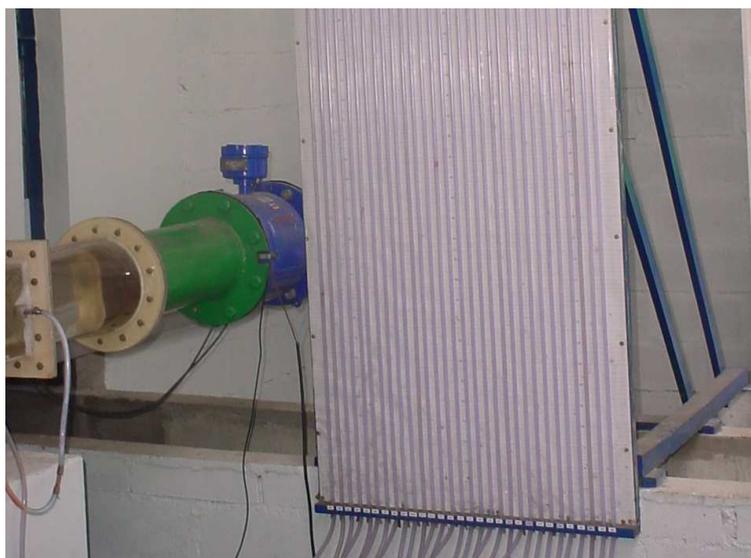


Figura 22. Quadro piezométrico utilizado nas medições de pressão preliminares.

Para a medição das pressões instantâneas, foram utilizados transdutores de pressão instalados na base e no teto dos condutos. Esses transdutores são do tipo piezoresistivos da marca Zurich, calibrados para a faixa de trabalho de -1mca a 2mca, com precisão de 0,1% em relação ao fundo da escala.

A Figura 23 ilustra os transdutores de pressão instalados nos aquedutos do modelo físico.

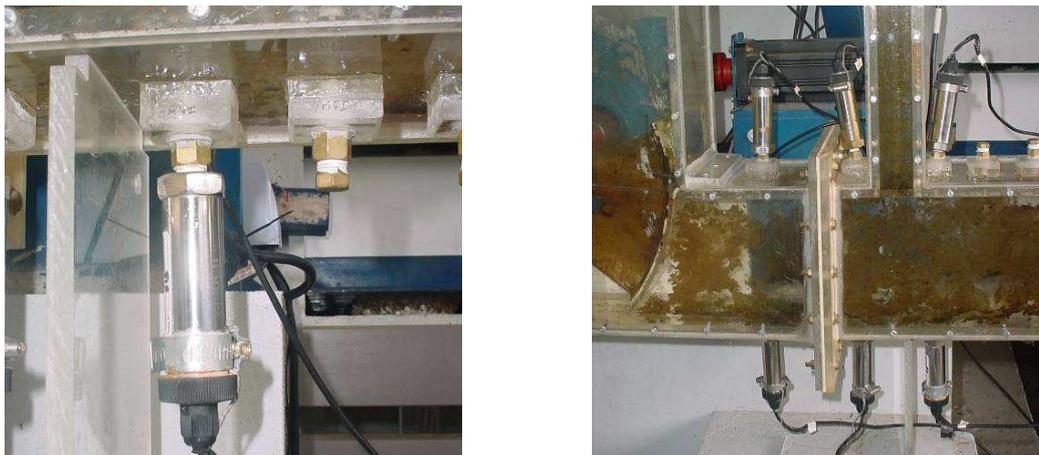


Figura 23. Detalhes dos transdutores de pressão utilizados

Os níveis de água nas cubas de montante e jusante e os níveis no interior da câmara da eclusa foram monitorados no modelo físico, tendo em vista a necessidade de imposição de distintas alturas de queda, tanto nos procedimentos de enchimento como nos procedimentos de esvaziamento da câmara da eclusa.

O monitoramento dos níveis das cubas foi feito através de medições com transdutores de pressão instalados em caixas de acrílico localizadas externamente as cubas de montante e jusante.

A Figura 24 ilustra os sistemas de medição de níveis utilizados no modelo físico.

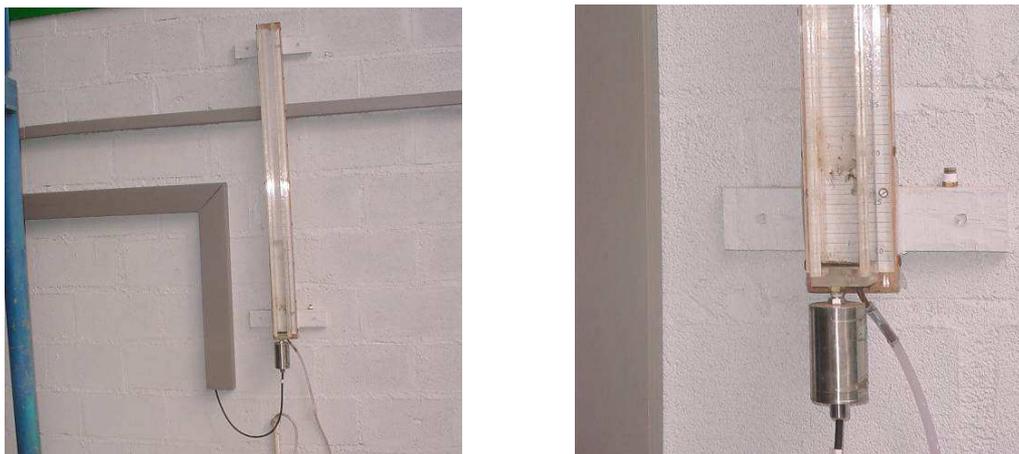


Figura 24. Transdutores para o monitoramento dos níveis das cubas

Nas condições de ensaio em regime permanente, a imposição de desníveis fixos e a estabilização do modelo são conduzidas a partir do acompanhamento dos níveis nas cubas, sem necessidade de registro digital.

Nas condições de regime variável (transitório), o monitoramento dos níveis d'água das cubas é continuado e registrado "instantaneamente", uma vez que estas variações têm forte influência sobre o comportamento das demais grandezas em análise durante os processos de enchimento/esvaziamento.

O monitoramento da abertura das comportas se faz necessário especialmente nas medições em regime variável (transiente). O objetivo dessas medições, então, é identificar instantaneamente a posição da comporta (percentual de abertura), possibilitando avaliar o comportamento das vazões e das pressões atuantes no piso e no teto do conduto para cada uma das condições de abertura estudada.

O sensor utilizado para essa medição é um potenciômetro que informa ao sistema de aquisição o grau de abertura da comporta através da medida do ângulo de rotação entre a posição inicial (zero) e a posição atual (Figura 25). Essa angulação é, posteriormente, convertida em percentual de abertura para tornar possível a correlação entre os parâmetros geométricos da manipulação da comporta.

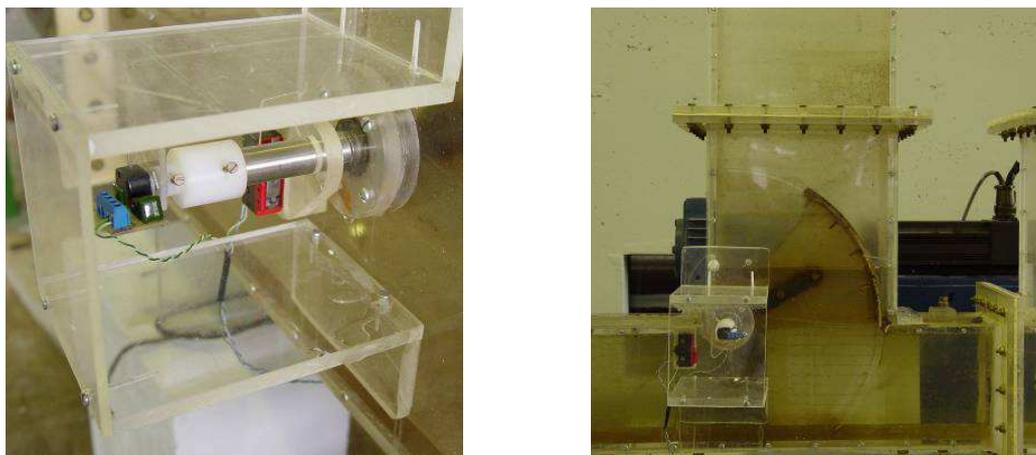


Figura 25. Potenciômetro para registro da abertura da comporta e sistema mecânico de acionamento

Nos ensaios em regime permanente, as comportas são posicionadas manualmente e ficam estáticas até o final dos ensaios. O ajuste da posição é feito com auxílio de uma escala graduada fixada à parede do conduto

A interface entre os instrumentos de medição e o usuário é o sistema de aquisição de dados (conversor analógico-digital) responsável pela conversão de sinais contínuos ao longo do tempo em sinais digitais (discretos), para que posteriormente possam ser analisados com as ferramentas estatísticas adequadas.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o ADS2000 da marca Lynx de 14 bits. Esse sistema conta com 32 entradas analógicas para a conexão dos equipamentos citados anteriormente.

O sistema tem capacidade de adquirir os sinais elétricos, e efetuar a conversão e a transmissão dos dados em um tempo tão pequeno quanto for à discretização dos ensaios, isto é, necessário para a reprodução fiel do fenômeno a ser estudado.

A transmissão dos dados é feita através de uma porta de comunicação RS 232 com um computador de padrões industriais.

A Figura 26 ilustra o sistema de controle do movimentador das comportas, o sistema de aquisição de dados e o computador no qual são registrados os dados coletados.

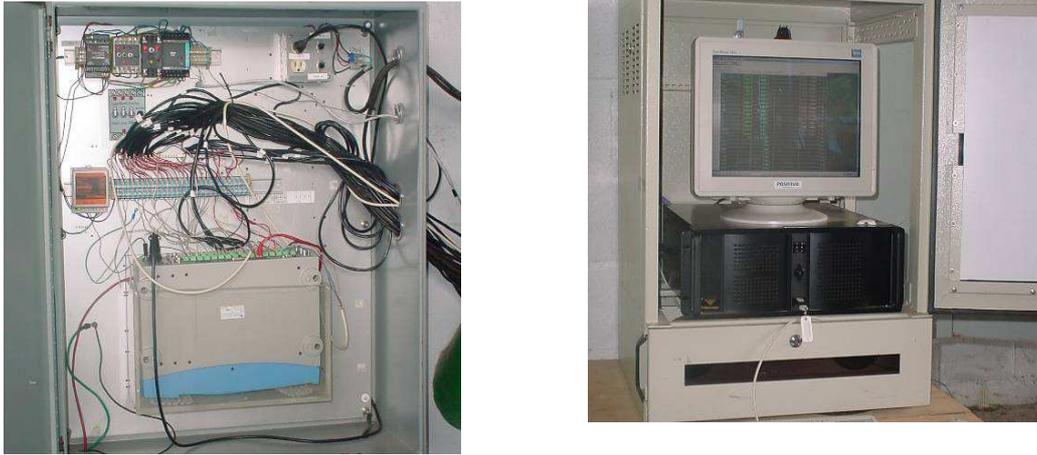


Figura 26. Sistema de controle e aquisição de dados

3.2. ENSAIOS REALIZADOS

No modelo experimental montado no LAHE foram conduzidos dois tipos de ensaios:

- Em regime permanente;
- Em regime transitório.

Nesses ensaios foram medidos para diferentes condições de escoamento:

- Desnível inicial entre as cotas dos níveis d'água entre a câmara e o reservatório na etapa de enchimento da eclusa;
- Posicionamento (abertura) das comportas;
- Pressões médias e pressões instantâneas junto ao fundo e ao teto do conduto;
- Controle da vazão que passa pelo conduto (em regime permanente e regime transitório);
- Velocidade de abertura da comporta no caso de regime transitório.

Para o desenvolvimento da pesquisa, os ensaios citados anteriormente foram subdivididos nos seguintes tipos:

- Ensaios preliminares em regime permanente com piezômetros;
- Ensaios em regime permanente com transdutor;
- Ensaios preliminares em regime transitório com transdutor;
- Ensaios em regime transitório com parada e com transdutor;
- Determinação da “vena contracta”;
- Determinação dos coeficientes de perda de carga na comporta.

A Figura 27 apresenta, esquematicamente, o modelo reduzido da eclusa instalada no LAHE e alguns parâmetros básicos relevantes para o entendimento do funcionamento do sistema do modelo reduzido.

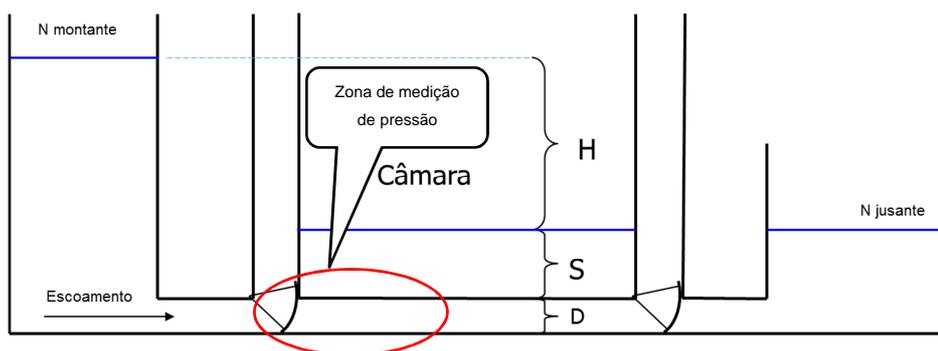


Figura 27. Esquema geral da eclusa implantada no LAHE

3.2.1. Ensaios em regime permanente

3.2.1.1. Ensaios preliminares em regime permanente com piezômetros

Para a determinação da zona de pressões mínimas foi desenvolvida uma campanha de ensaios preliminares em regime permanente com uso de piezômetros (Figura 22). Esses piezômetros foram posicionados ao longo do conduto a jusante da comporta em seu eixo de simetria, em nove pontos distintos (PM 4 a PM 12), conforme Figura 28. Os ensaios foram conduzidos utilizando 4 diferentes desníveis entre montante e jusante - Hp1, Hp2, Hp3, Hp4, variando de 0,23m a 0,63m, e cinco diferentes aberturas de comporta - 10%, 30%, 50%, 60%, 100%.

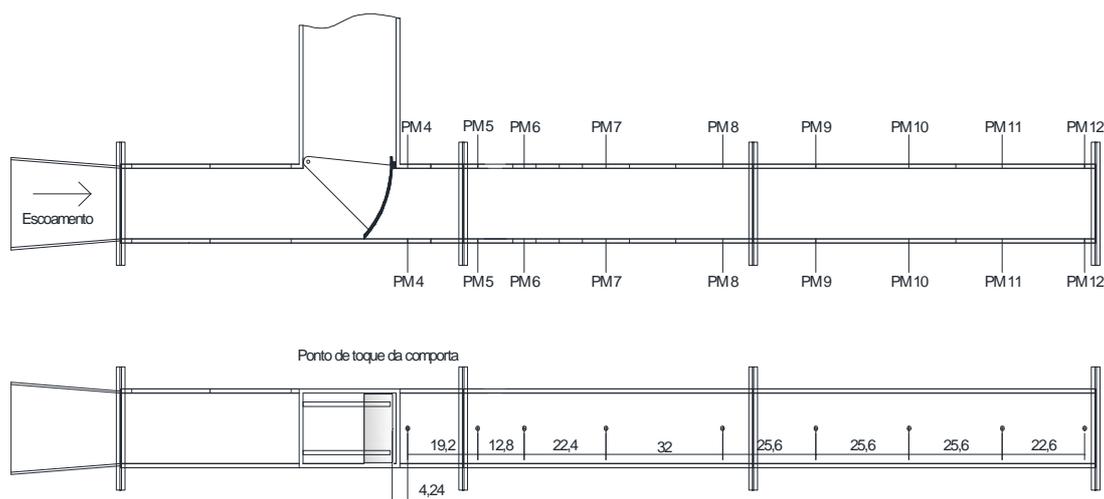


Figura 28. Posicionamento das tomadas piezométricas.

Observa-se pela Figura 29, que para uma mesma abertura da comporta, a medida que a vazão cresce, a pressão média mínima diminui. Pode-se observar também que as pressões médias mínimas ocorrem na posição PM 5 ou PM 6 (2ª ou 3ª tomada de pressão). Ou seja, as pressões mínimas ocorrem numa região que se estende da comporta até aproximadamente 0,5 metros para jusante. Em função disto e das informações do modelo implantado no IPH (Kempka, 2011), foram escolhidos 3 pontos no teto e 3 pontos na base do conduto (T5, T6, T7), levando em consideração as limitações físicas da estrutura do LAHE para a instalação dos transdutores de pressão (Figura 30). Com isto, tentou-se garantir que os pontos críticos fossem contemplados nos ensaios.

A fim de auxiliar no monitoramento do desenvolvimento longitudinal das pressões ao longo do conduto, onde o escoamento da comporta possa ainda ter influência, foram instalados mais 3 transdutores na base do conduto (T3, T13, T15) e 2 no teto do conduto (T13, T15), conforme Figura 30. Essas tomadas de pressão foram utilizadas nos ensaios em regime permanente com transdutor.

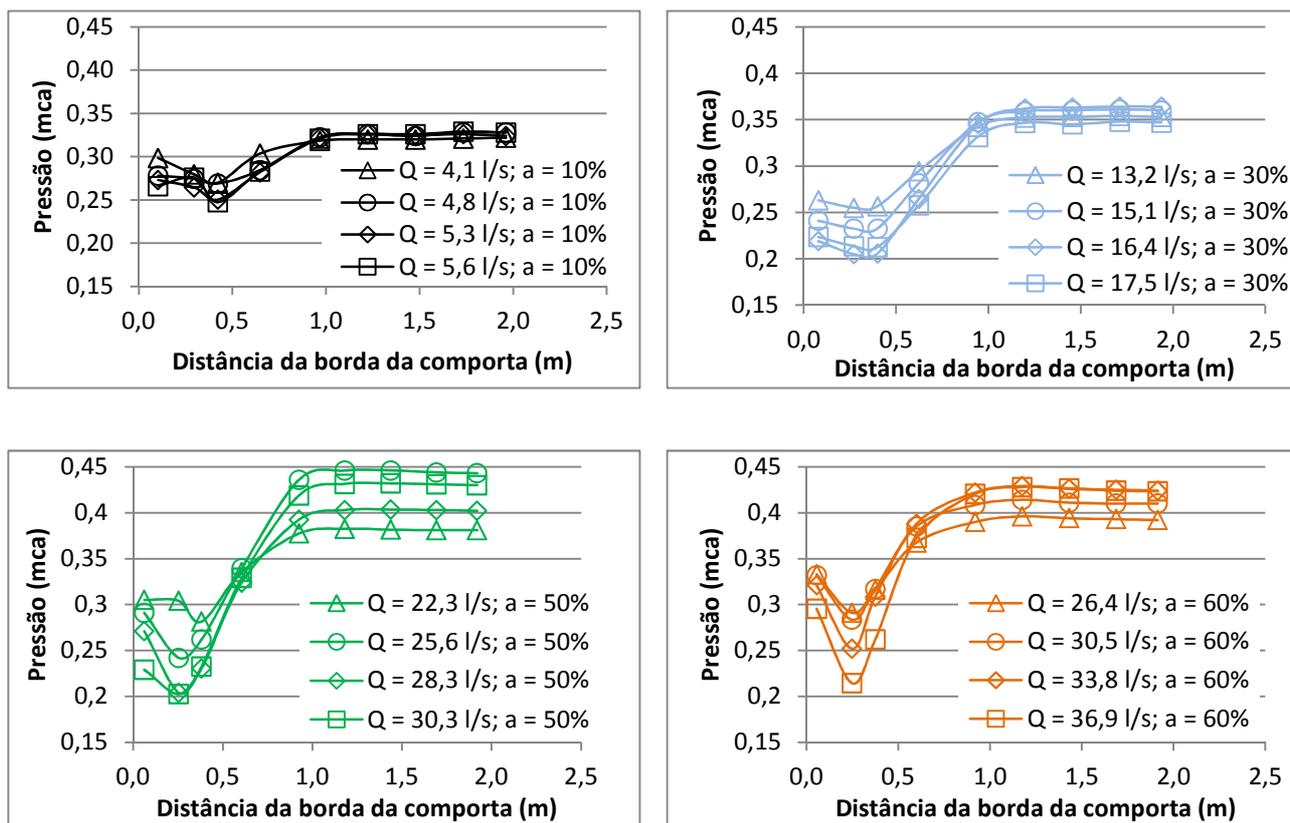


Figura 29. Pressões médias (piezômetros) medidas na base do conduto a jusante da comporta para diferentes aberturas e vazões.

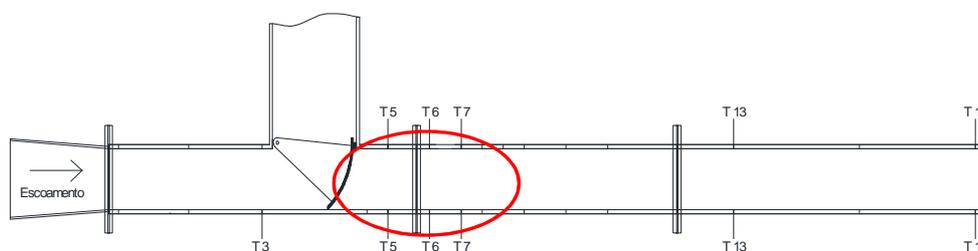


Figura 30. Posição das tomadas de pressão para os ensaios em regime permanente

Os ensaios foram efetuados para valores de relação de carga (relação entre a energia cinética do escoamento e a altura do conduto) entre 1,61 a 6,34. Essa relação é obtida com o uso da seguinte equação:.

$$Rc = \frac{\left(\frac{V_c^2}{2g}\right)}{D} \quad \text{equação 8}$$

onde:

V_c = velocidade média do escoamento na “vena contracta”;

g = aceleração da gravidade;

D = altura do conduto

3.2.1.2. Ensaios em regime permanente com transdutor

A partir dos ensaios preliminares em regime permanente e de adaptações feitas no modelo, com a introdução de calhas para manter o nível constante no reservatório foi possível obter vazões máximas maiores que as verificadas anteriormente nos ensaios preliminares. As vazões intermediárias ensaiadas foram baseadas no trabalho de Kempka (2011) e transpostas para o modelo do LAHE (através da relação de escalas de 1:1,56 (modelo IPH $D_{IPH} = 0,25$ m, modelo LAHE $D_{LAHE} = 0,16$ m), onde D é a altura do conduto. Os ensaios realizados nesta etapa estão listados na Tabela 2.

Tabela 2. Ensaios em regime permanente com transdutor

VAZÃO	ABERTURA								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	100%
4,6	X	-	-	-	-	-	-	-	-
5,2	X	X	X	-	-	-	-	-	-
5,9	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7,2	X	X	X	-	-	-	-	-	-
8,6	X	-	-	-	-	-	-	-	-
9,2	-	X	X	X	X	X	X	X	X
10,5	-	X	X	X	X	X	X	X	X
13,1	-	X	X	X	X	X	X	X	X
16,6	-	X	-	-	-	-	-	-	-
19,7	-	-	X	X	X	X	X	X	X
23,2	-	-	X	-	-	-	-	-	-
26,2	-	-	-	X	X	X	X	X	X
29,1	-	-	-	X	-	-	-	-	-
33,8	-	-	-	-	X	-	-	-	-
36,7	-	-	-	-	-	X	-	-	-
39,2	-	-	-	-	-	-	X	-	-
40,5	-	-	-	-	-	-	-	X	-
41,1	-	-	-	-	-	-	-	-	X

3.2.2. Ensaios em regime transitório

3.2.2.1. Ensaios preliminares em regime transitório com transdutor

Nos ensaios em regime transitório, simulam-se situações reais de operação de uma eclusa de navegação. Nesses ensaios foram utilizados três diferentes níveis de montante, e para cada nível, foram ensaiadas quatro leis de abertura das comportas, como demonstra a Tabela 3, salientando que todas as leis de abertura ensaiadas são do tipo linear (Figura 31). Para todas as situações acima foram simuladas manobras de enchimento e de esvaziamento da câmara da eclusa. Para fim de simplificação, os desníveis entre montante e jusante foram denominados de H1, H2, H3, sendo seus valores em metros de 0,48m, 0,64m e 0,80m, respectivamente.

Tabela 3. Ensaios realizados em regime transitório

Situação	Posição	Desnível inicial (m)	Velocidade de abertura (mm/s)			
			1,8	2,7	3,1	3,6
Enchimento	Base	H1 = 0,48	-	x	x	x
		H2 = 0,64	-	x	x	x
		H3 = 0,80	-	x	x	x
	Teto	H1 = 0,48	x	x	x	x
		H2 = 0,64	x	x	x	x
		H3 = 0,80	x	x	x	x
Esvaziamento	Base	H1 = 0,48	x	x	x	x
		H2 = 0,64	x	x	x	x
		H3 = 0,80	x	x	x	x
	Teto	H1 = 0,48	x	x	x	x
		H2 = 0,64	x	x	x	x
		H3 = 0,80	x	x	x	x

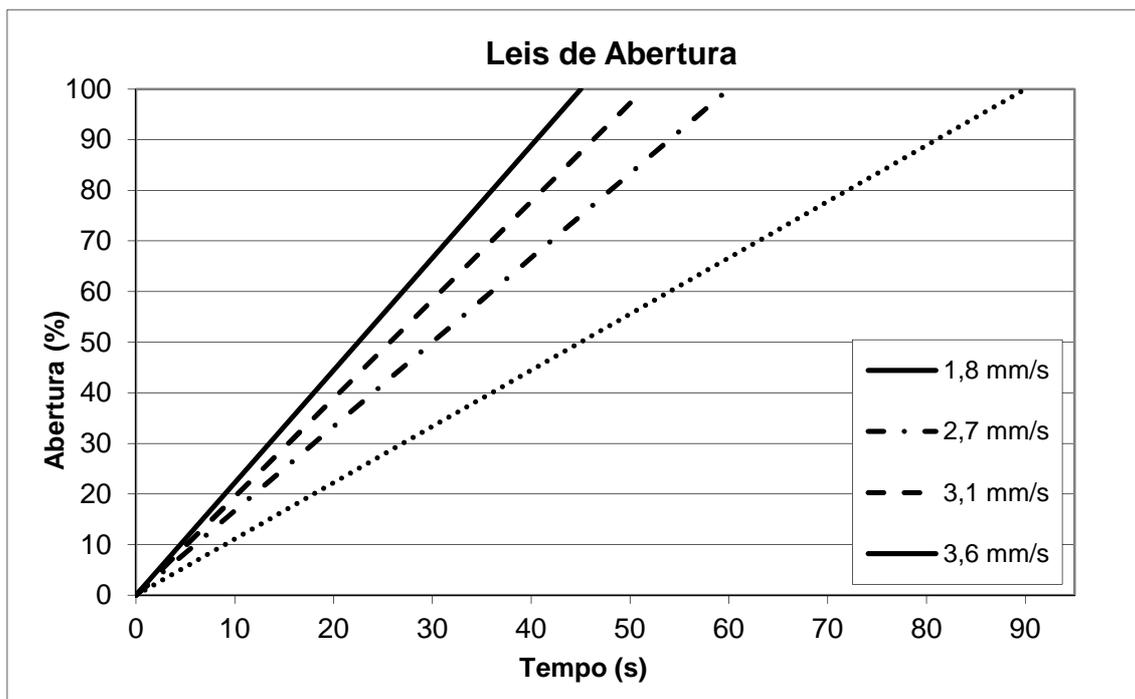


Figura 31. Leis de abertura lineares utilizadas

Esses ensaios preliminares em regime transitório serviram para a definição dos critérios a serem observados nos ensaios de regime transitório com transdutor e com parada.

As medições das pressões instantâneas foram conduzidas nos aquedutos de enchimento e esvaziamento, onde a operação da comporta, ou ainda, o escoamento induz esforços extremos de pressão nas paredes do conduto, que podem vir a comprometer o funcionamento do sistema.

Nos ensaios em regime transitório foram monitoradas as vazões instantâneas. Com o registro dessas vazões é possível efetuar o monitoramento do regime transitório que ocorre no sistema, bem como o cálculo da velocidade de ascensão ou declínio do nível d'água dentro da câmara.

Os transdutores de pressão foram instalados tanto no piso quando no teto dos aquedutos, conforme Figura 32, a montante e a jusante da comporta, visando monitorar as pressões atuantes em regime transiente.

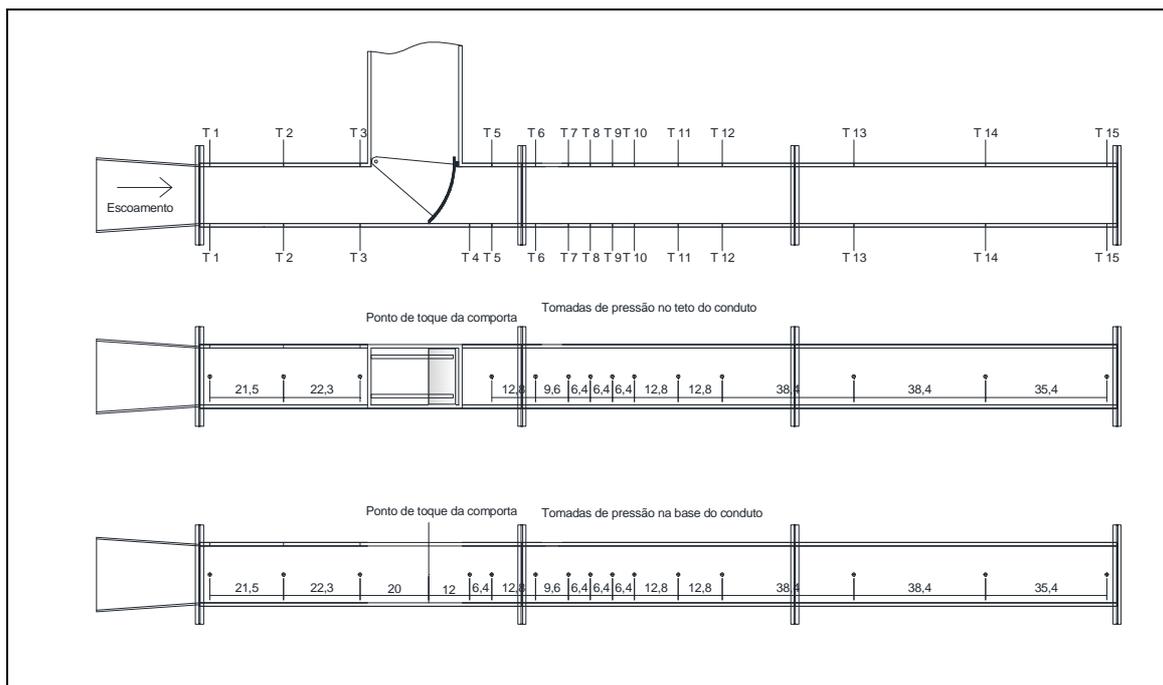


Figura 32. Posicionamento das tomadas de pressão nos condutos

3.2.2.2. Ensaios em regime transitório com parada e com transdutor

Os ensaios em regime transitório com interrupção da abertura foram realizados da seguinte forma:

- Inicia-se a abertura da comporta com uma das leis de abertura já citadas (Figura 31);
- Interrompe-se a operação da comporta quando ela chega a uma determinada abertura selecionada anteriormente;
- A abertura então é mantida na posição de parada até o fim do enchimento da câmara;
- O procedimento foi repetido para as aberturas variando de 10% a 90% em intervalos de 10%.

É importante lembrar que as leis de abertura utilizadas são as mesmas do regime transitório (Figura 31), e que os ensaios foram realizados apenas para o desnível H3 da Tabela 4.

Para todas as situações acima descritas, foram simuladas apenas manobras de enchimento da câmara da eclusa. Neste caso foi somente considerado o desnível H3, pois a partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares em regime transitório, identificou-se que as pressões negativas, mais críticas ocorreram apenas para esta situação de desnível entre montante e jusante.

Foram utilizados nestes ensaios apenas os transdutores instalados nas posições T5, T6 e T7, na base e teto do conduto, pois como já visto anteriormente, estas são as posições onde ocorrem as pressões médias mínimas, que são as de interesse desta pesquisa.

Tabela 4. Ensaios realizados em regime transitório

Situação de ensaio	Posição	Desnível H3 (m)	Abertura da parada (%)	Velocidade de abertura (mm/s)		
				1,8	2,7	3,6
Enchimento	Base	0,80	10	x	X	x
			20	X	X	x
			30	X	X	X
			40	X	X	x
			50	x	X	X
			60	X	X	x
			70	X	X	X
			80	x	X	X
			90	X	X	X
	Teto	0,80	10	x	X	X
			20	X	X	X
			30	X	X	X
			40	X	X	X
			50	X	X	X
			60	X	X	X
			70	X	X	X
			80	X	X	X
			90	X	x	X

Os ensaios com parada foram efetuados para valores de R_c entre 1,61 a 6,34.

3.3. COEFICIENTE DA “VENA CONTRACTA”

Para a determinação do coeficiente da “vena contracta” (coeficiente de contração do escoamento a jusante da comporta), foram considerados os resultados obtidos em Kempka (2011), que utilizou os dados medidos em uma estrutura semelhante de comporta tipo segmento invertida (Figura 33). Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 34.

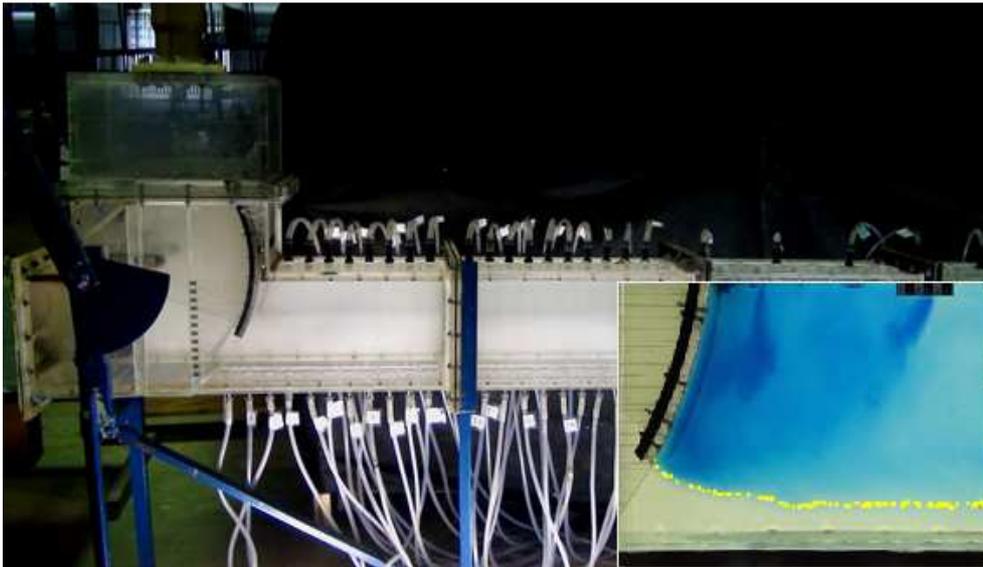


Figura 33. Estrutura utilizada para determinação da “vena contracta”

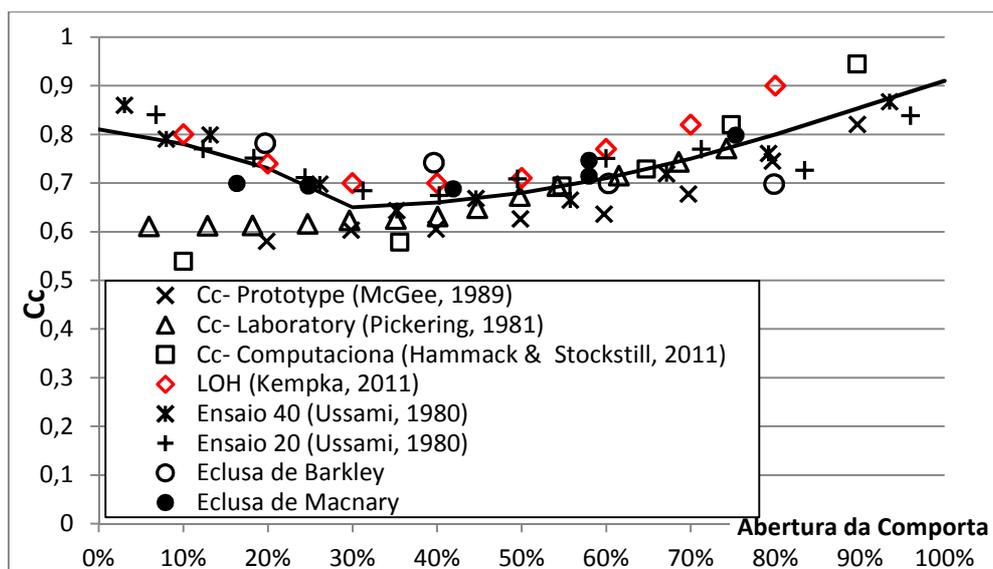


Figura 34. Coeficiente de contração na comporta - comparação com a literatura

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo será dedicado à avaliação dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados no modelo físico reduzido para regime permanente para os quais foi analisado o comportamento das distribuições de pressão média, flutuações de pressão, coeficientes de assimetria e curtose, pressões extremas mínimas ($P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$) conforme ocaso de ocorrerem para o regime permanente. Também serão analisados os resultados dos ensaios em regime transitório onde serão abordados os comportamentos das pressões médias e pressões extremas mínimas $P_{1\%}$.

4.1. ANÁLISES EM REGIME PERMANENTE

4.1.1. Comportamento da distribuição longitudinal das pressões médias

Neste item serão abordadas as análises realizadas em regime permanente, procurando identificar a região de pressões médias mínimas e as zonas onde o escoamento está plenamente estabelecido, a partir da análise dos dados dos transdutores de pressão. Depois de identificada a região de pressões médias mínimas para cada situação, foi utilizado para fins de cálculos o valor médio mínimo de pressão entre os transdutores da zona de pressão mínima. As pressões sempre serão referenciadas como altura de pressão em metros de coluna d'água (m.c.a.).

A Figura 35 apresenta esquematicamente o comportamento das pressões médias ao longo do conduto e a região onde ocorrem as pressões médias mínimas, foco de interesse desta pesquisa.

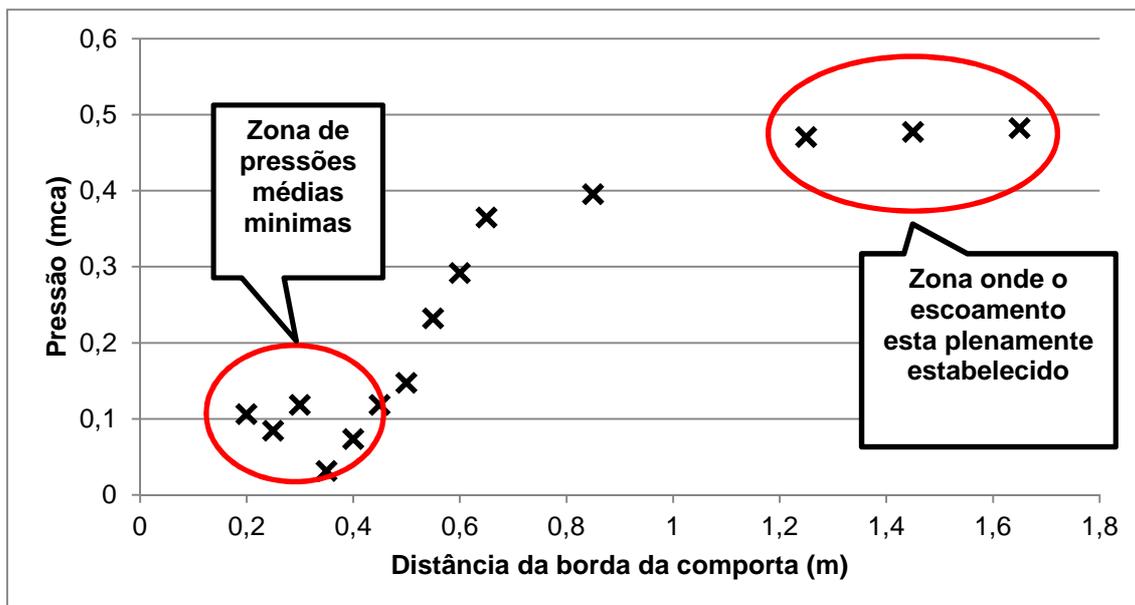


Figura 35. Identificação da zona de pressões mínimas e zona de escoamento plenamente estabelecido

A Figura 36 apresenta o escoamento para uma abertura de 40%, mostrando esquematicamente como o mesmo se comporta, a formação do rolo e da 'vena contracta'. Os pontos de medição na região de pressões mínimas estão identificados pelas setas.

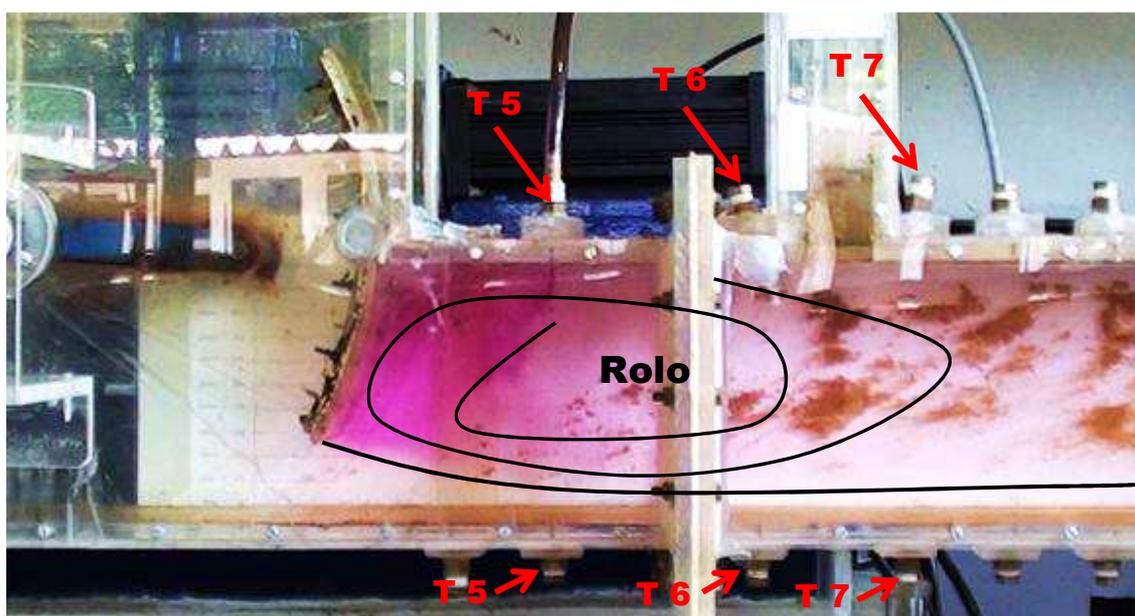


Figura 36. Visualização do escoamento para uma abertura de 40% e posicionamento das tomadas de pressão

Quando se analisam os dados de pressão média obtidos para o teto e base do conduto, observa-se que eles apresentam comportamento semelhante

para as tomadas de pressão de mesma posição em relação à borda da comporta. Porém apresentam valores distintos para o teto e base do conduto, como pode se visualizar na Figura 37. A diferença é de aproximadamente 0,16m, o que corresponde à altura do conduto.

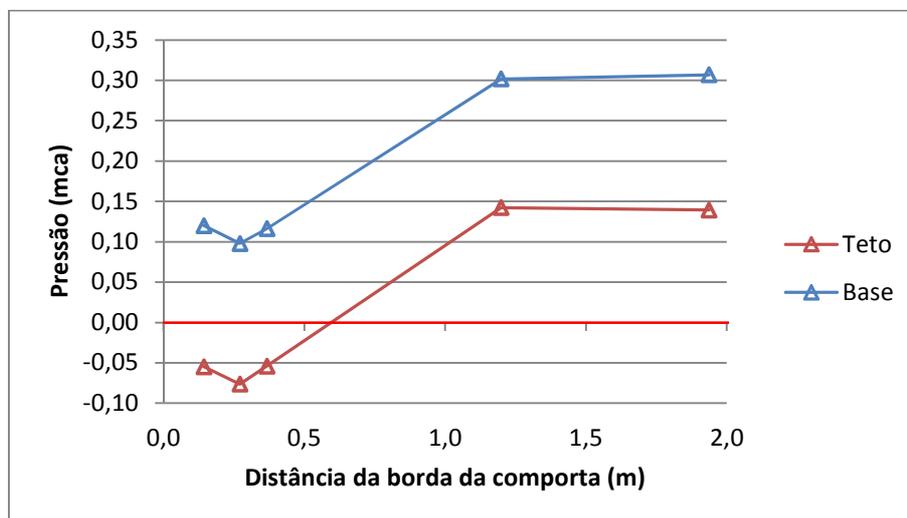


Figura 37. Distribuição das pressões médias ao longo do conduto para abertura de comporta de 30% e vazão de 19,7 l/s

O conhecimento das pressões médias mínimas que ocorrem a jusante das comportas em eclusas de navegação é essencial para o dimensionamento confiável das estruturas, uma vez que com base nas pressões médias mínimas, pode-se inferir se haverá ou não risco de erosão e/ou cavitação.

Em regime permanente, as menores pressões médias ocorrem no teto para aberturas de comporta entre 20% a 40%, portanto pode-se inferir que nesta faixa de aberturas exista uma maior possibilidade de risco de cavitação, isto será visto mais detalhadamente nos itens 4.1.1.1 e 4.1.1.2.

4.1.1.1. Comportamento das pressões médias na base do conduto

As pressões médias mínimas na base do conduto sofrem influência da vazão, da abertura da comporta e do desnível entre montante e jusante.

Para uma mesma abertura o aumento da vazão leva a uma pressão mínima menor, como pode ser visto na Figura 38, e a um aumento na pressão na zona do escoamento plenamente estabelecido (onde o efeito da comporta não exerce mais influência no escoamento).

Analisando as pressões médias para uma abertura fixa variando-se a vazão é possível observar um pequeno deslocamento para jusante do ponto de menor pressão. Com o aumento da vazão, esse deslocamento é percebido para valores pequenos de abertura entre 10% e 20%. É possível verificar ainda que para aberturas maiores que 50%, o ponto de menor pressão se desloca para uma seção próxima à comporta na tomada de pressão T5 (Figura 38).

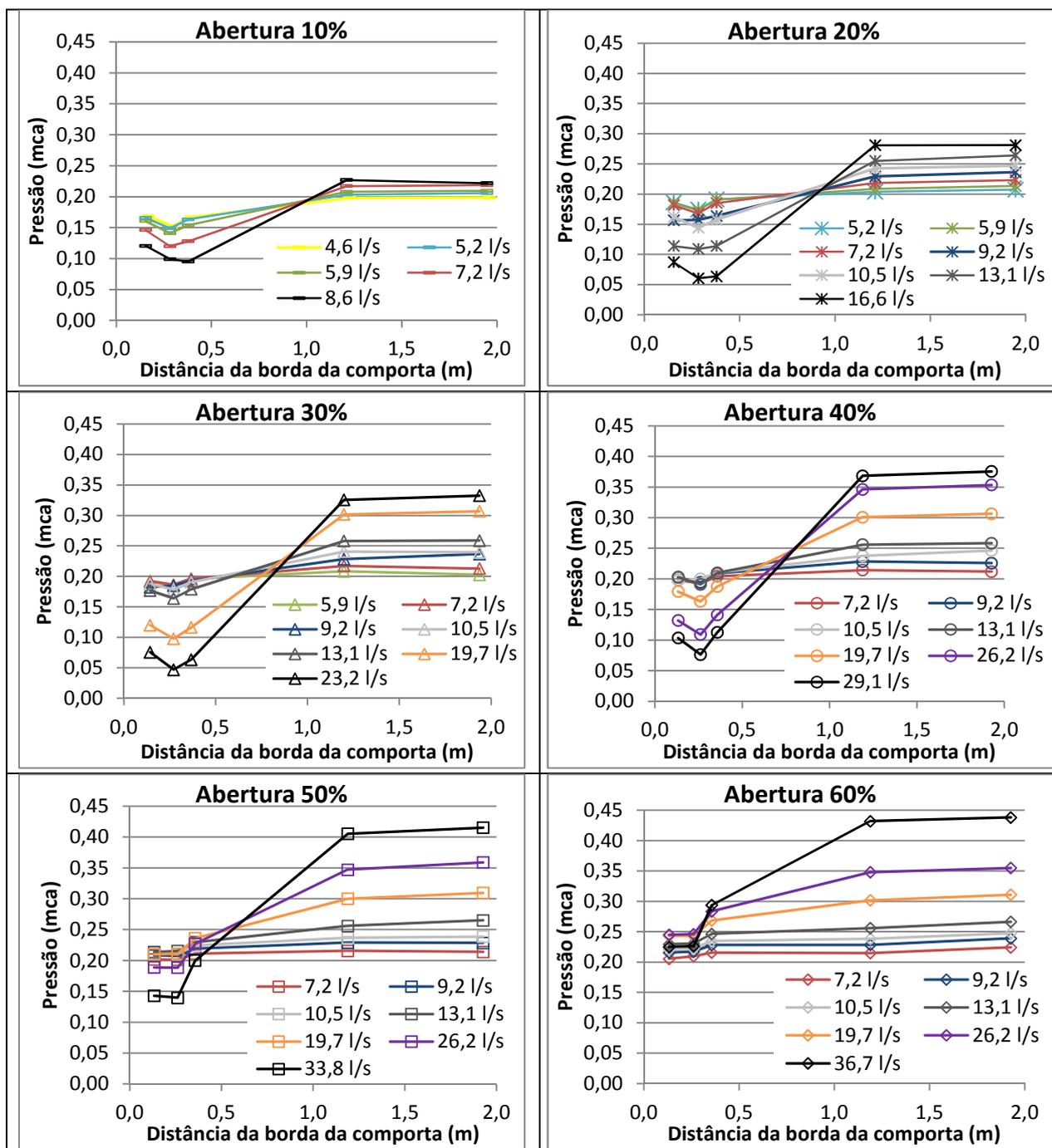


Figura 38. Comportamento das pressões médias para a base do conduto para diferentes vazões e aberturas de comporta fixa

Para as aberturas entre 20% e 40% ocorreram as menores pressões médias mínimas, e esses valores ocorreram sempre na posição T6 (Figura 38). Ainda observa-se que para a abertura de 30% ocorreram as menores pressões, indicando que nessa posição existem maiores riscos de dano à estrutura. As pressões médias mínimas para a base do conduto chegaram a valores próximos de zero, porém não foram observadas pressões médias mínimas negativas para as situações estudadas, o que não indica que pressões negativas não possam ocorrer na base.

A partir de 13 vezes a altura do conduto (D), as pressões tendem a ficar estáveis, o que demonstra que a partir dessa seção o escoamento está plenamente estabelecido na seção do conduto, ou seja, os efeitos da comporta não são mais relevantes.

A Figura 39 mostra uma mesma vazão para diferentes graus de abertura da comporta. A partir dos gráficos dessa figura pode-se observar que a diminuição da abertura provoca pressões médias mínimas menores para uma mesma vazão, e isso comprova que as pressões médias mínimas estão diretamente relacionadas ao aumento da velocidade do escoamento.

É possível verificar também que para cada vazão estudada existe um ponto onde a pressão assume praticamente o mesmo valor para todas as aberturas de comporta. Essa posição é relativa à tomada T13, que está posicionada a aproximadamente 13 D da comporta, e a partir dessa seção verifica-se que as pressões seguem valores praticamente constantes, para todas as vazões com mesma abertura.

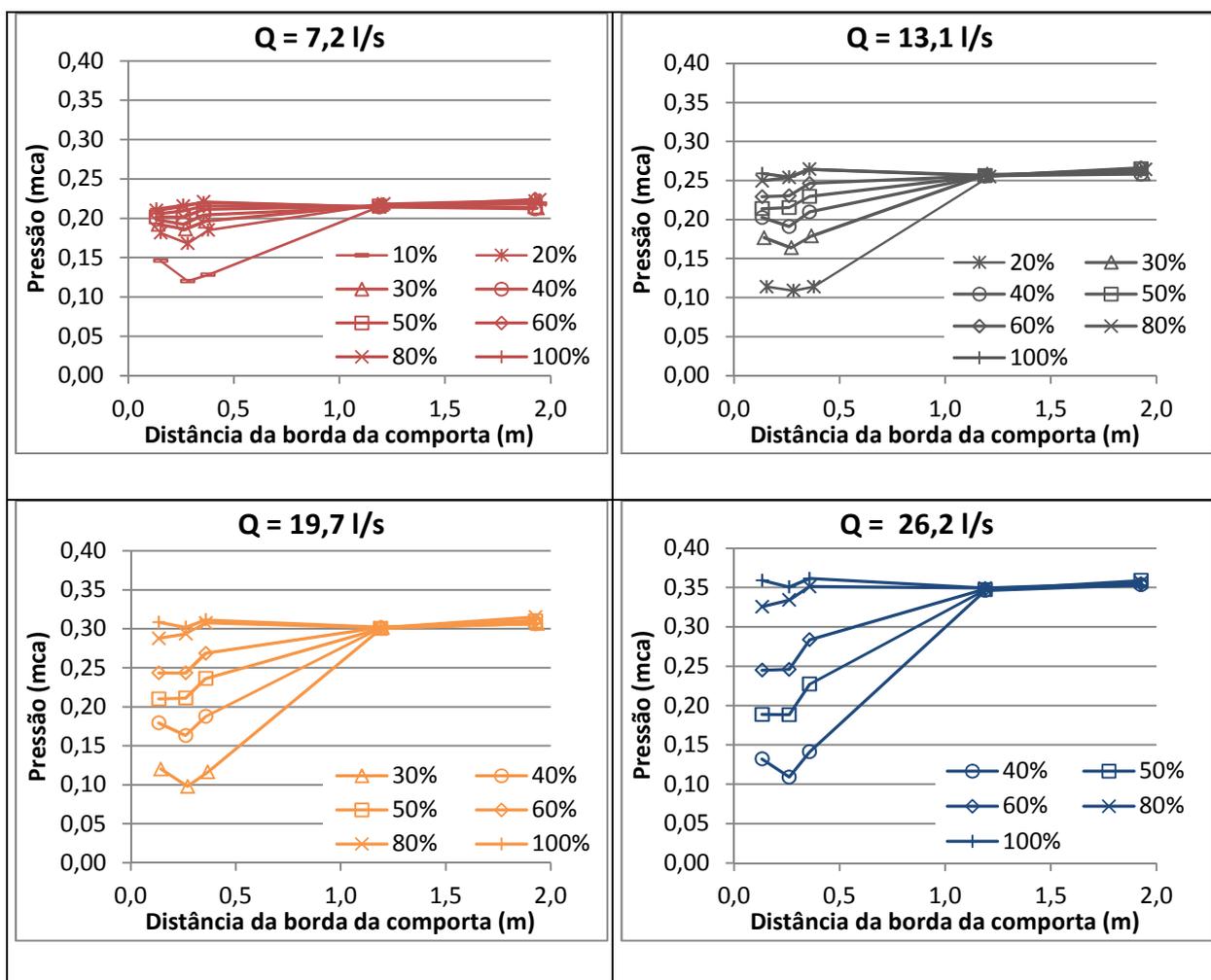


Figura 39. Comportamento das pressões médias para a base do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta

Diante do exposto neste item, conclui-se que, na base do conduto:

- Para uma mesma vazão, aberturas menores levam a menores pressões médias mínimas;
- Para uma mesma abertura, maiores vazões levam a menores pressões médias mínimas.

4.1.1.2. Comportamento das pressões médias no teto do conduto

O comportamento das pressões médias para o teto do conduto é semelhante ao das pressões médias na base do conduto, porém os valores de pressão são distintos, conforme dito anteriormente. A partir da análise dos dados da Figura 40 é possível observar que os valores no teto são sempre

menores que na base do conduto e também surgem valores de pressão média negativos para aberturas menores que 50%.

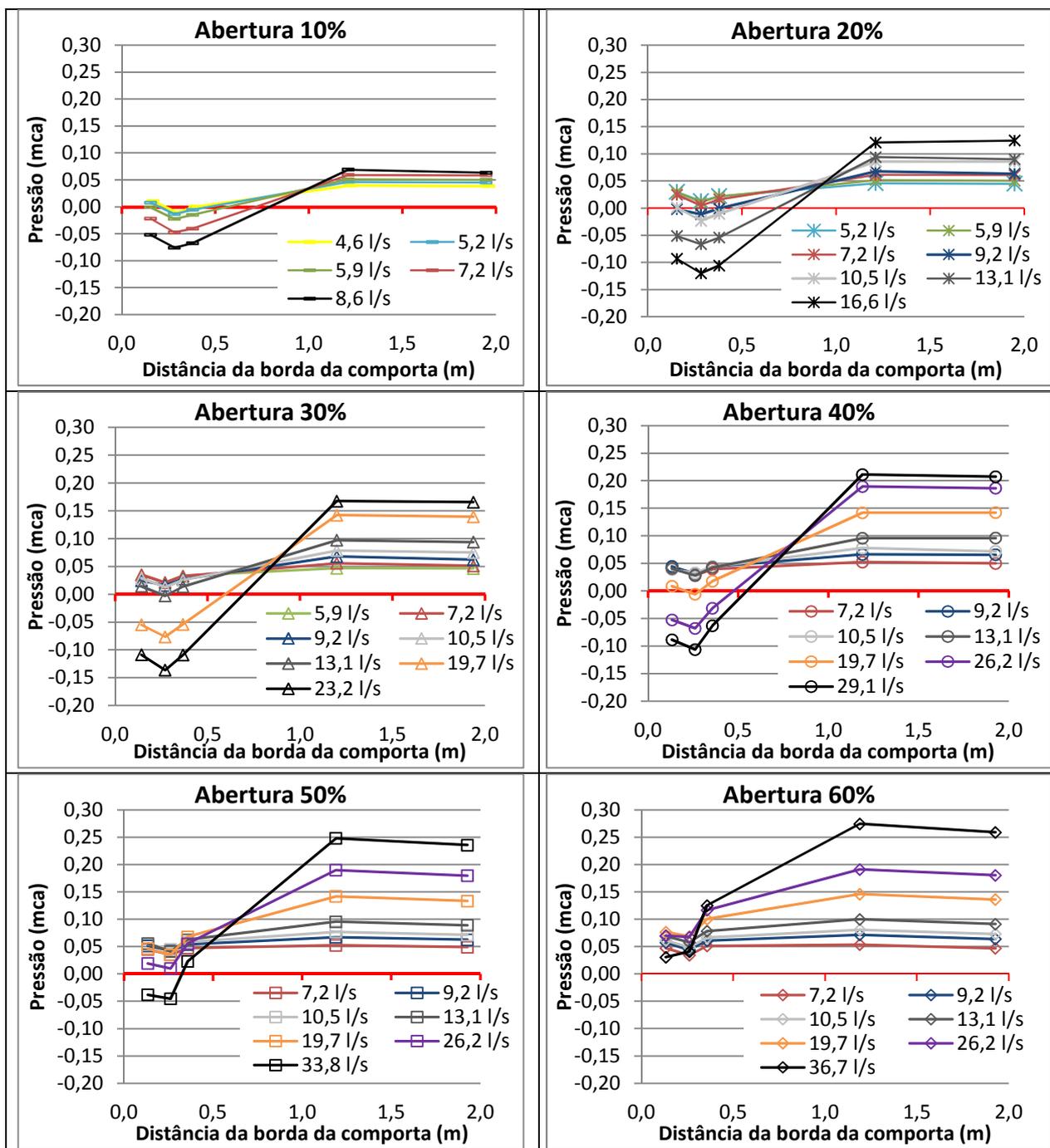


Figura 40. Comportamento das pressões médias para o teto do conduto para diferentes vazões e abertura de comporta fixa

No caso do teto do conduto, quando se fixa a vazão e varia-se o grau de abertura das comportas, observa-se um resultado semelhante ao da base, porém neste caso ocorreram valores negativos para as menores aberturas estudadas para cada vazão (Figura 41). É possível visualizar também que para

distâncias da ordem de 13 D da borda da comporta, os valores ficam aproximadamente constantes assim como ocorre para a base.

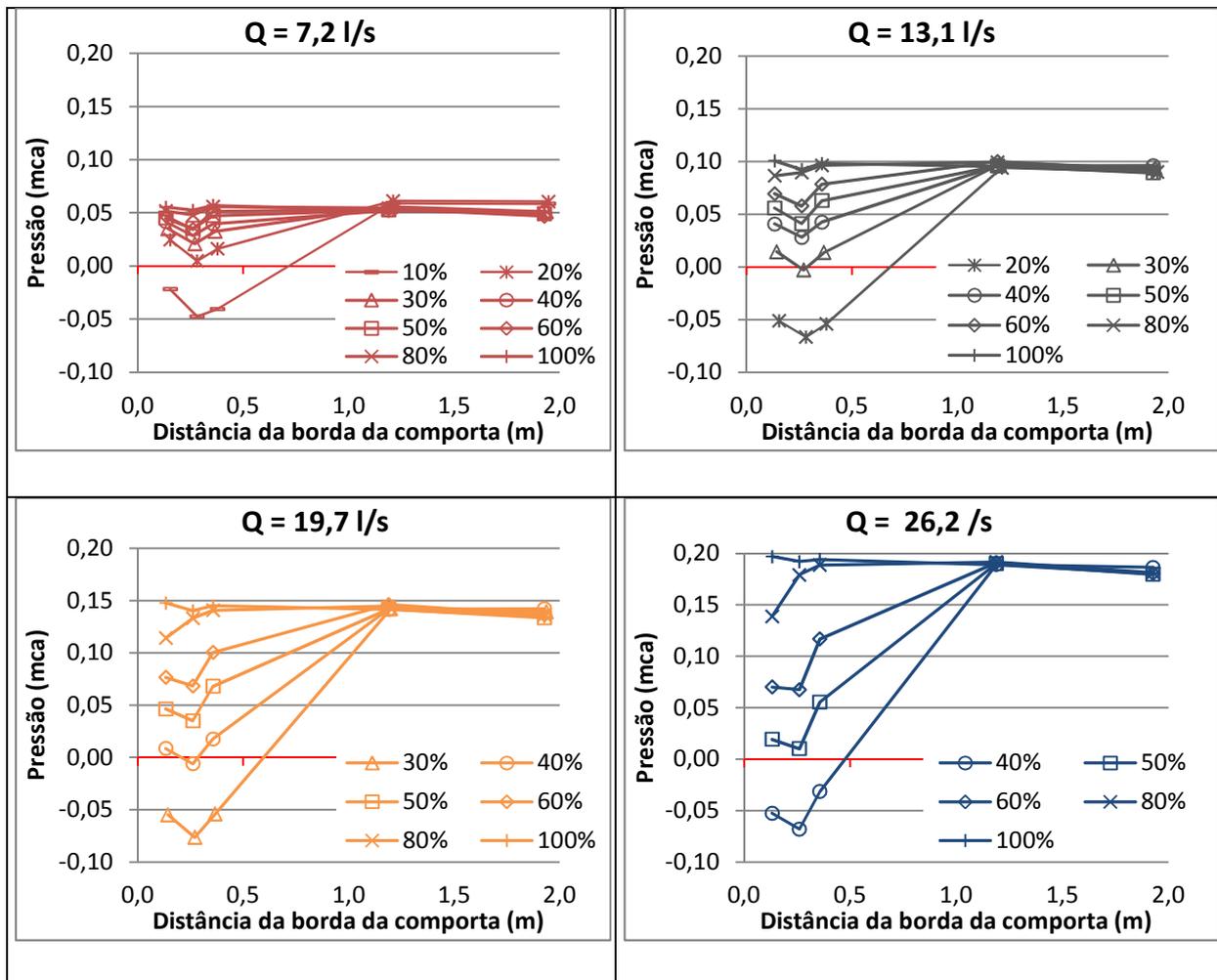


Figura 41. Comportamento das pressões médias para o teto do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta

Diante do exposto neste item, conclui-se que, para o teto do conduto:

- Para uma mesma vazão, aberturas menores levam a menores pressões médias mínimas;
- Para uma mesma abertura, maiores vazões levam a menores pressões médias mínimas.

4.1.2. Comportamento do coeficiente de pressão média mínima (CP_{min})

Para analisar os resultados se utilizou a relação entre a pressão média mínima e a energia cinética do escoamento (coeficiente de pressão

adimensional), conforme mostrado na equação a seguir (esse coeficiente é baseado em uma simplificação do número de Euler):

$$C_{P_{\min}} = \frac{P_{\min}}{\frac{V_c^2}{2g}} \quad \text{equação 9}$$

onde:

P_{\min} = pressão média mínima (pressão média na posição onde ocorreram as pressões mínimas);

V_c = velocidade média do escoamento na “vena contracta”;

g = aceleração da gravidade.

O valor da velocidade média do escoamento na “vena contracta” é assim obtido:

$$V_c = \frac{Q}{B \cdot C_c \cdot a} \quad \text{equação 10}$$

onde:

Q = vazão;

B = largura do conduto;

C_c = coeficiente de contração do escoamento a jusante da comporta;

a = abertura da comporta.

Para a análise das condições onde poderiam ocorrer pressões médias mínimas negativas, foi utilizado o parâmetro adimensional A_m proposto por Kempka (2011). Esse coeficiente considera a celeridade em função da velocidade do escoamento na “vena contracta” multiplicado pela raiz quadrada da abertura da comporta e é expresso pela equação a seguir:

$$A_m = \frac{C}{V_c} \cdot \sqrt{\frac{a}{D}} \quad \text{equação 11}$$

onde:

C = celeridade no conduto;

D = altura do conduto.

Para o cálculo de A_m , foi adotado um valor de celeridade (C) de 1265 m/s, conforme recomendado por Hwang (1984) para tubos de parede rígida.

A Figura 42 apresenta os coeficientes de pressão média mínima (CP_{min}) em função do adimensional A_m para a base do conduto. Observa-se que neste caso não houve valores negativos. Cabe salientar que o fato de não ter ocorrido valores negativos para o coeficiente de pressões não implica que não possa ocorrer cavitação para outras condições (vazões). Isso porque escoamentos turbulentos e com grande energia geram grandes flutuações de pressão, o que pode levar a pressões instantâneas negativas, como será visto no capítulo 4.6.1.

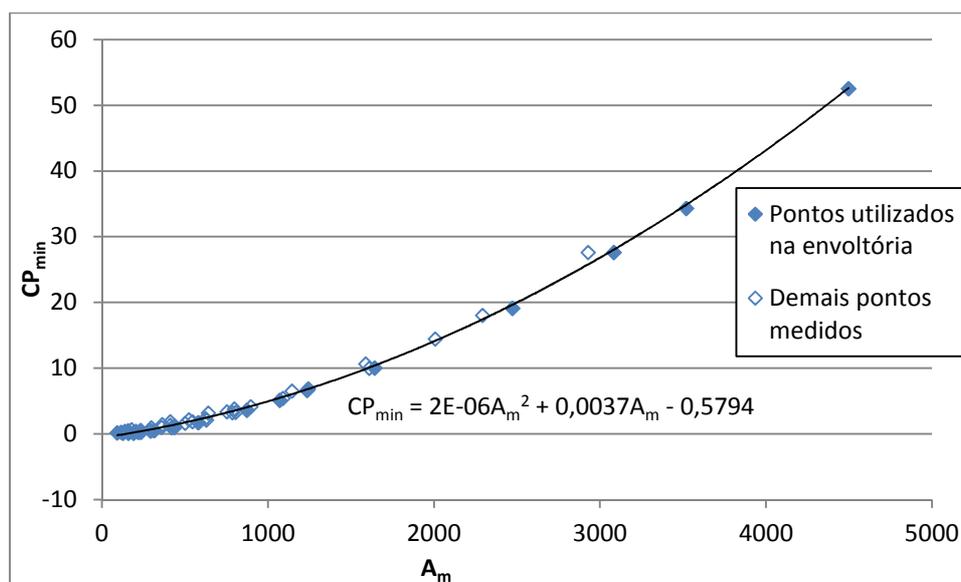


Figura 42. Coeficiente de pressão (CP_{min}) para a base do conduto

O coeficiente de pressão CP_{min} para o teto do conduto (Figura 43) apresenta valores negativos quando A_m é menor que 300 e Rc está entre 1,61 e 6,34.

A partir dos dados das Figura 42 e Figura 43 foi possível ajustar equações de envoltória inferior, de maneira a se estimar os valores de pressões médias mínimas que podem ocorrer em diferentes condições de escoamento.

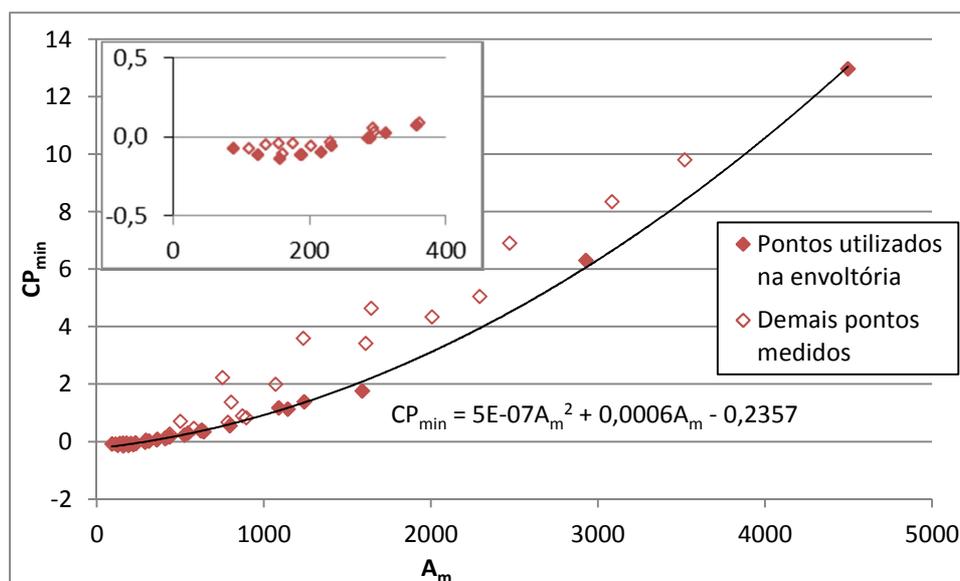


Figura 43. Coeficiente de pressão (CP_{\min}) para o teto do conduto, com equação da envoltória inferior

Verifica-se uma dispersão maior nos dados no teto do conduto que pode estar relacionada com a região de recirculação formada próxima ao teto à jusante da comporta.

4.1.3. Comportamento das flutuações de pressão

O conhecimento do comportamento da flutuação de pressão ao longo dos condutos aliado ao conhecimento das pressões mínimas dão um maior grau de certeza para o dimensionamento das estruturas, assim como para a previsão de valores extremos. Conhecendo-se as regiões de maior flutuação de pressão, é possível projetar estruturas com maior confiabilidade, prevendo-se regiões onde esta deverá ser mais resistente. Visto que a literatura a respeito deste assunto é bastante escassa, apenas serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios.

Na Figura 44 pode-se observar que a flutuação de pressão comporta-se de maneira distinta para teto e base do conduto na região próxima à comporta. Entretanto, para a região onde o escoamento está plenamente estabelecido, observa-se que os valores de flutuação para base e teto tendem a assumir valores muito próximos.

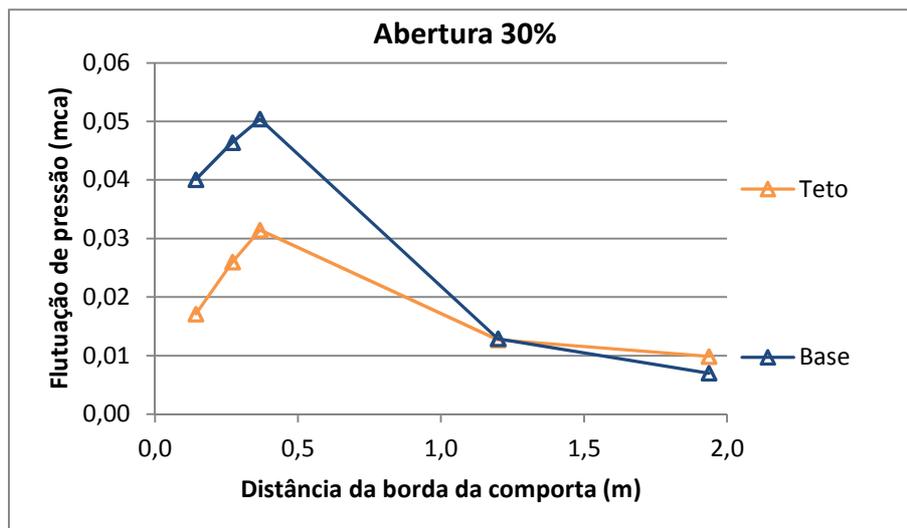


Figura 44. Comportamento das flutuações de pressão para a base e teto do conduto para uma abertura de 30% e vazão de 19,7 l/s

Observa-se também na Figura 44 que as flutuações de pressões para a base do conduto são significativamente maiores. Isso está relacionado às maiores velocidades do fluxo na base devido à contração do escoamento sob a comporta, podendo indicar que, apesar de na base do conduto as pressões médias serem maiores que no teto, as flutuações de pressão maiores, também podem vir a ocasionar danos na estrutura.

Supõe-se, com isso, que os valores de flutuação de pressão máxima tenham ocorridos na proximidade das tomadas T7, já que nessa região ocorrem as máximas flutuações de pressão.

4.1.3.1. Flutuação de pressão na base do conduto

A Figura 45 apresenta a comparação da pressão média com a flutuação de pressão para a base do conduto, sendo possível verificar que o valor mínimo de pressão média ocorre para a posição T6, e o valor máximo de flutuação de pressão ocorre para a posição T7. Uma vez que os valores de flutuação de pressão seguem um padrão ascendente nas posições próximas à comporta, não é possível ter certeza de que o maior valor ocorreu realmente na posição T7. Pode-se observar, contudo, que na base do conduto as maiores flutuações de pressão não ocorrem na mesma seção que as menores pressões médias. Entretanto, as pressões médias mínimas ocorrem nas tomadas de pressão anterior, a tomada onde ocorre à máxima flutuação de pressão, o que

indica que existe uma região de pressões médias mínimas e máximas flutuações de pressão.

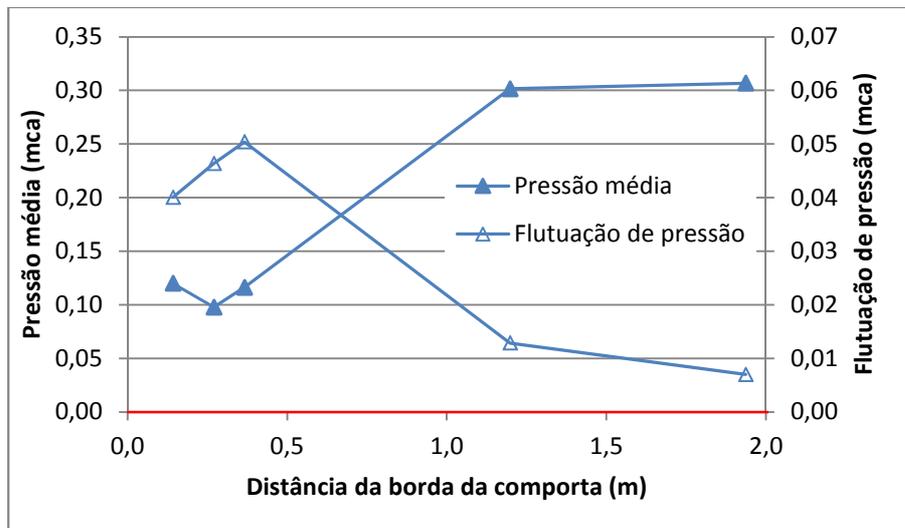


Figura 45. Comparação da pressão média com a flutuação de pressão ao longo da base do conduto para uma abertura de 30% e vazão de 19,7 l/s

Através do conjunto de gráficos da Figura 46, observa-se que a flutuação de pressão cresce com o aumento da vazão para uma mesma abertura.

Para abertura de 10%, os valores máximos de flutuação de pressão ocorrem na tomada T5, situado mais próximo à comporta. Para aberturas maiores que 10% os valores de máxima flutuação de pressão se deslocam para jusante ocorrendo na tomada T7. Conforme a abertura aumenta as flutuações de pressão aumentam até assumirem valores máximos para a abertura de 30%, decrescendo com bastante rapidez com o aumento da abertura. Para aberturas de 60% as flutuações de pressão já são menores que a metade do valor máximo.

É importante salientar, conforme, já relatado anteriormente, que para todos os ensaios em que as flutuações de pressão máxima ocorreram na posição T7, este pode não ser o valor máximo absoluto, pois não é possível afirmar que o valor máximo não tenha ocorrido em uma posição intermediária entre T7 e T13 devido ao grande espaçamento entre eles.

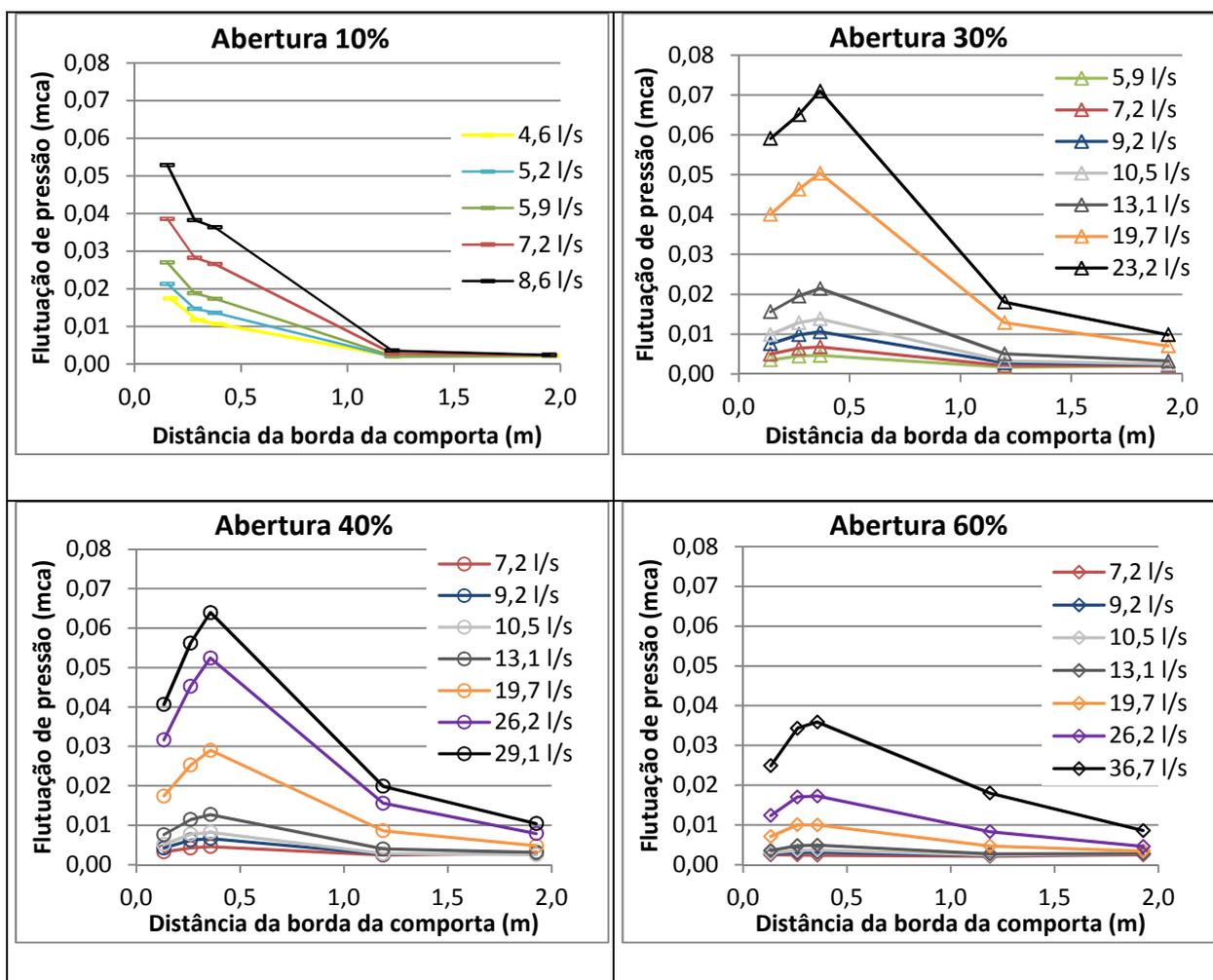


Figura 46. Comportamento da flutuação de pressão na base do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta

Observa-se pelo conjunto de gráficos da Figura 47 que quando fixa-se a vazão para aberturas de comporta menores, ocorrem as maiores flutuações de pressão. Para aberturas menores que 20%, os maiores valores de flutuação de pressão ocorrem no primeiro ponto de medição (T5) logo a jusante da comporta, decrescendo conforme se afasta da comporta. No entanto, para aberturas entre 30% e 60%, as flutuações de pressão têm valores máximos no terceiro ponto de medição (T7) a jusante da comporta, também decrescendo para jusante. Para aberturas maiores de 60% as flutuações de pressão comportam-se de forma praticamente constante em todo o comprimento do conduto.

Portanto, pode-se inferir que as flutuações de pressão máximas, na maior parte dos casos, ocorrem em uma região antes de 2D a jusante da comporta e decrescem rapidamente para jusante. Para a confirmação da região de maior

flutuação de pressão é necessário que se tenham mais pontos de medição de pressão.

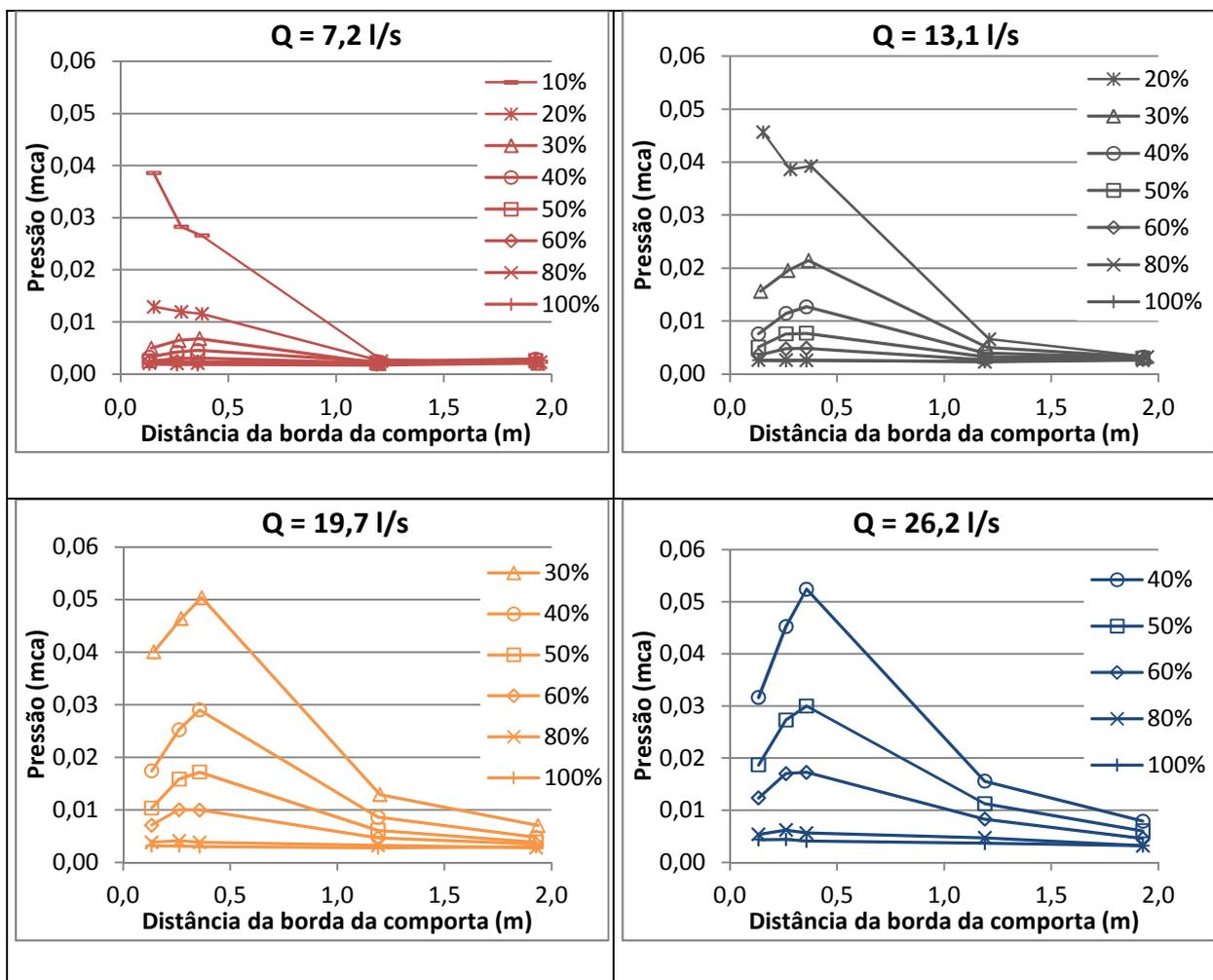


Figura 47. Comportamento das flutuações de pressão para a base do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta

4.1.3.2. Flutuação de pressão no teto do conduto

As flutuações de pressão no teto do conduto apresentam comportamento similar ao da base (Figura 48), ou seja, para uma mesma abertura, a flutuação de pressão aumenta com a vazão, e para uma mesma vazão, as aberturas menores têm uma maior flutuação de pressão. Os valores de máxima flutuação de pressão ocorrem geralmente na posição T7, aproximadamente a 2 D a jusante da comporta. Observa-se que para todas as aberturas, as vazões inferiores a 13,1 l/s geraram flutuações de pressão menores que 1cm, e que a diferença na flutuação de pressão para uma mesma abertura, em muitos casos, foi menor que 0,3cm, sendo que o erro máximo do transdutor de pressão pode chegar a 0,3cm. Este fato indica que para maior confiabilidade

nos resultados é necessário que se estudem as flutuações de pressão em modelos reduzidos de maior escala, ou transdutores de pressão mais precisos.

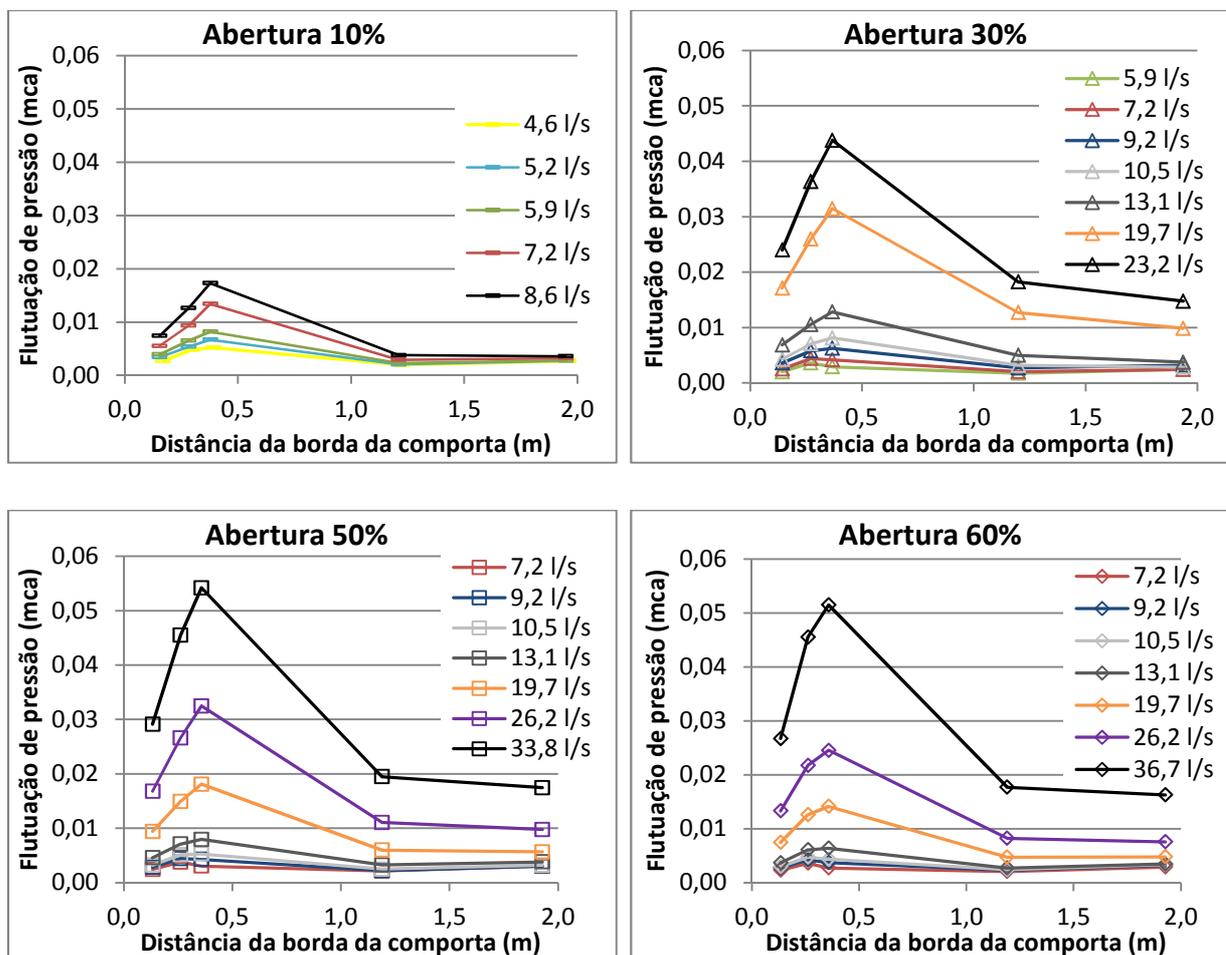


Figura 48. Comportamento da flutuação de pressão no teto do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta

O conjunto de gráficos da Figura 49 mostra as flutuações de pressão no teto do conduto para vazões fixas, variando-se o grau de abertura da comporta. Observa-se um comportamento semelhante ao encontrado na base do conduto. As flutuações de pressão para uma determinada vazão diminuem com o aumento da abertura das comportas. Para aberturas superiores a 80% as flutuações máximas ocorreram na tomada T6. Para todas as outras situações as máximas flutuações de pressão ocorreram na posição T7, não sendo possível confirmar que esses são realmente os valores máximos, como já descrito anteriormente para o caso da flutuação de pressão na base.

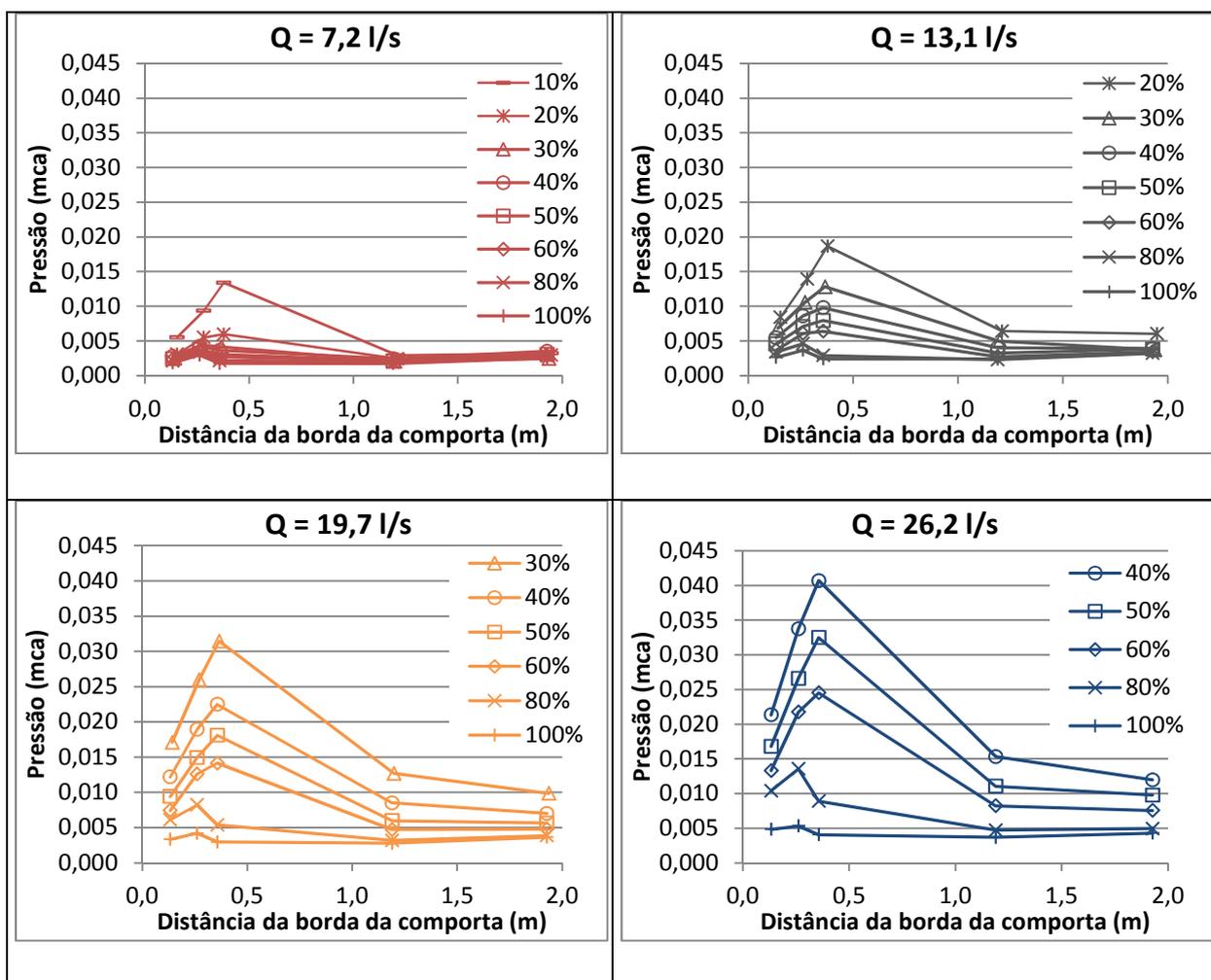


Figura 49. Comportamento das flutuações de pressão para o teto do conduto fixando-se a vazão para diferentes aberturas da comporta

4.1.3.3. Coeficiente de flutuação de pressão

As flutuações de pressão são avaliadas pelo desvio padrão da amostra e podem ser adimensionalizadas através do coeficiente de flutuação de pressão CP' , conforme a equação a seguir.

$$CP' = \frac{\sigma}{\frac{V_c^2}{2g}}$$

equação 12

onde:

σ = flutuação de pressão (desvio padrão amostral);

V_c = velocidade do escoamento na “vena contracta”;

g = aceleração da gravidade.

O conhecimento da distribuição das flutuações de pressões em conjunto com o coeficiente de pressão média mínima (CP_{mim}) a jusante da comporta tipo segmento invertida permite inferir a possibilidade de ocorrência de risco de danos à estrutura.

Na Figura 50 podem-se visualizar os coeficientes de flutuação de pressão (CP') em função do adimensional A_m para o caso da base do conduto. São apresentados os valores para as tomadas de pressão T5, T6 e T7. Observa-se que as maiores diferenças entre flutuações ocorreram para valores de $A_m < 1500$, e a partir desse valor de, as flutuações de pressão ficaram praticamente iguais para todas as tomadas.

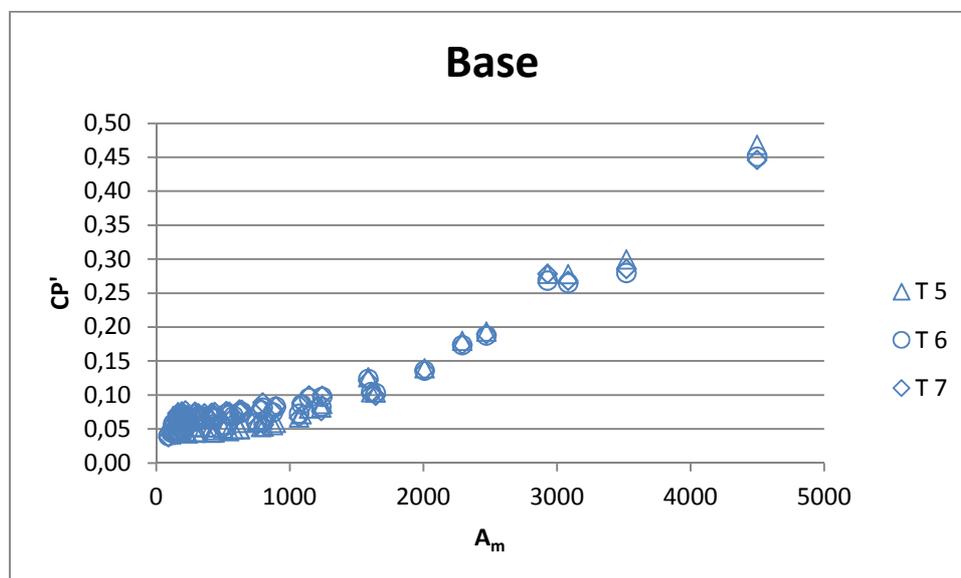


Figura 50. Coeficiente adimensional de flutuação de pressão para a base do conduto nas posições T5, T6 e T7

A Figura 51 apresenta os coeficientes de flutuação de pressão (CP') em função do adimensional A_m para o teto. Observa-se que as maiores flutuações ocorreram, na maioria das vezes, na tomada T6. Observa-se também uma maior dispersão nos dados, este fato pode estar relacionado ao escoamento não estar plenamente desenvolvido na seção do conduto.

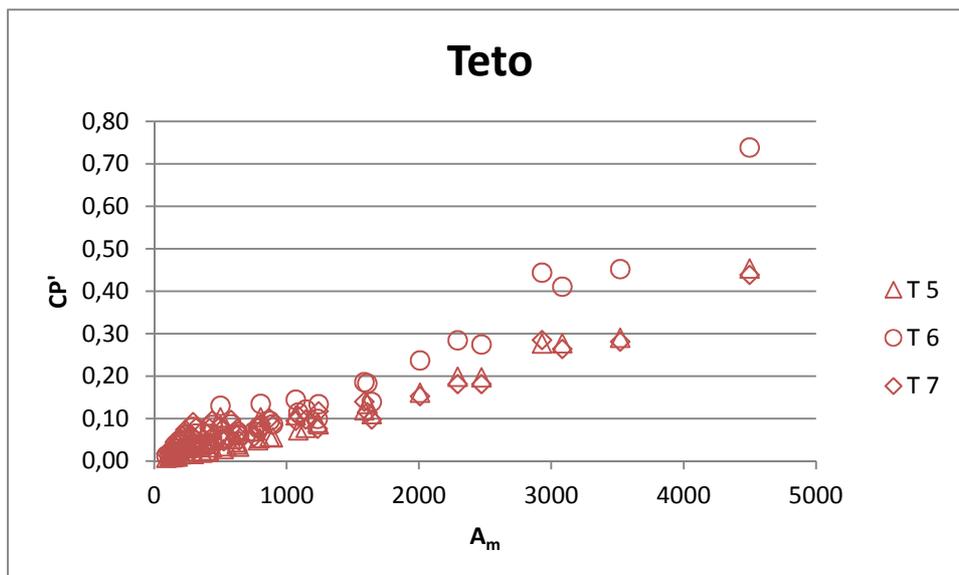


Figura 51. Coeficiente adimensional de flutuação de pressão para o teto do conduto nas posições T5, T6 e T7

Na Figura 52 podem-se visualizar os coeficientes de flutuação de pressão (CP') em função do adimensional A_m para a base e o teto do conduto nos pontos onde ocorreram as pressões médias mínimas para as diferentes vazões e aberturas de comporta ensaiadas. A figura apresenta, também, a equação ajustada a partir desses dados. Observa-se que no teto foram registradas as maiores flutuações de pressão a partir de valores de $A_m > 500$. Para valores de $A_m < 500$, a base apresentou valores maiores que o teto.

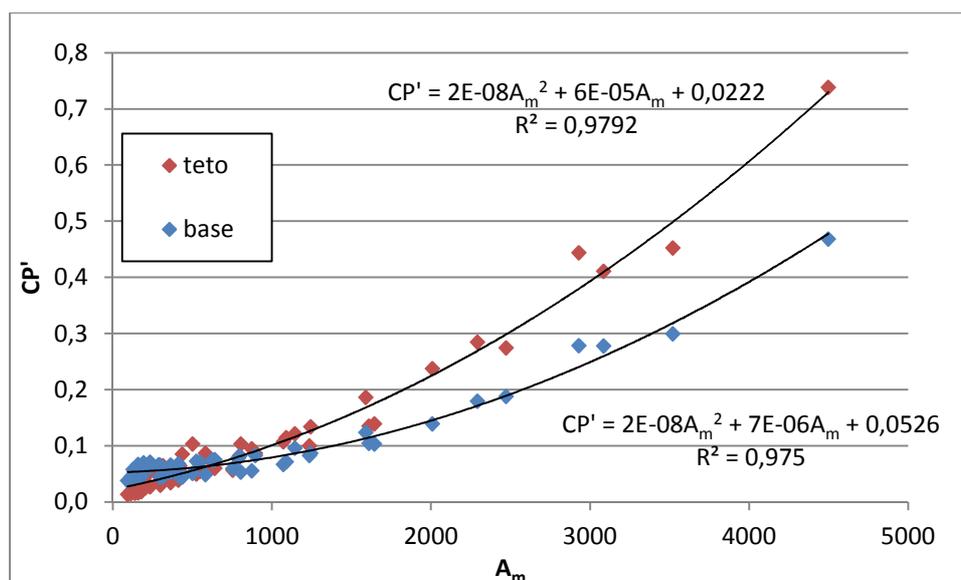


Figura 52. Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão para os pontos de pressão mínima no teto e na base do conduto

4.1.4. Coeficiente de assimetria

O comportamento do coeficiente de assimetria da função densidade de probabilidade das amostras permite estimar o comportamento do escoamento. Assimetria positiva indica que o escoamento está colado à estrutura, indicando que a maior parte dos valores está acima da média, mas que há alguns valores bem inferiores, e a assimetria negativa apresenta a maior parte de valores abaixo da média, mas há alguns valores bem superiores à média.

Os valores dos coeficientes de assimetria afastados de zero indicam que as pressões naquele ponto não seguem uma distribuição normal (entretanto, somente esse coeficiente não é suficiente para generalizar esse fato).

Na Figura 53, são apresentados os valores do coeficiente de assimetria para as amostras onde ocorreram pressões médias mínimas em função do parâmetro A_m , e observa-se que:

* na base - o coeficiente de assimetria para as pressões mínimas tende a ser positivo praticamente em toda a faixa ensaiada, indicando a presença de valores de pressão acima da média;

* no teto - o coeficiente de assimetria para as pressões mínimas tende a ser negativo para $A_m < 1000$, indicando a presença de valores de pressão significativos abaixo da média, demonstrando que a maioria dos valores da amostra tende a ser menor que a média. Para $A_m > 1000$ a maioria dos valores tende a ser maior que a média.

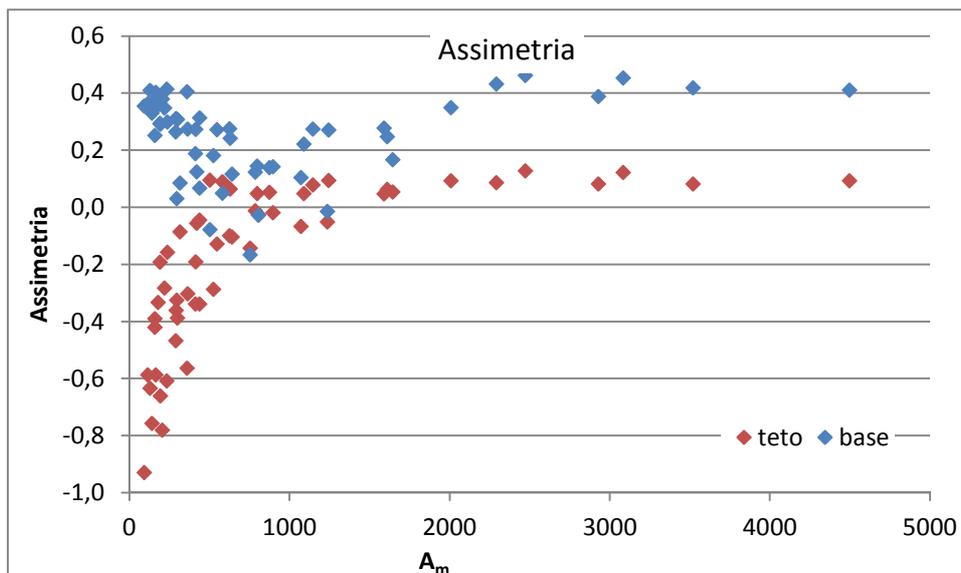


Figura 53. Distribuição do coeficiente de assimetria para a base e teto do conduto para os pontos onde ocorreram as pressões mínimas

4.1.5. Coeficiente de curtose

O coeficiente de curtose de uma distribuição indica o seu grau de achatamento em relação a uma distribuição normal. Para uma distribuição normal, o coeficiente de curtose é igual a 3 (SPIEGEL, 1993). Esse valor, associado ao coeficiente de assimetria, indica a tendência da amostra de seguir uma distribuição normal ou não. Para seguir uma distribuição normal, a assimetria tem que ser próxima de zero e o coeficiente de curtose próximo de 3.

A Figura 54 apresenta o comportamento do coeficiente de curtose para a base e teto do conduto. Na figura fica clara a tendência do coeficiente de curtose de apresentar grande variação para valores de A_m menores que 800, indicando que a distribuição tem comportamento bastante distinto de uma distribuição normal. Entretanto, para valores de A_m maiores que 800, os dados apresentam uma tendência de se aproximarem do valor 3, o que, associado com o coeficiente de assimetria, demonstra a tendência da distribuição ter comportamento de uma distribuição normal para valores de A_m maiores que 1000.

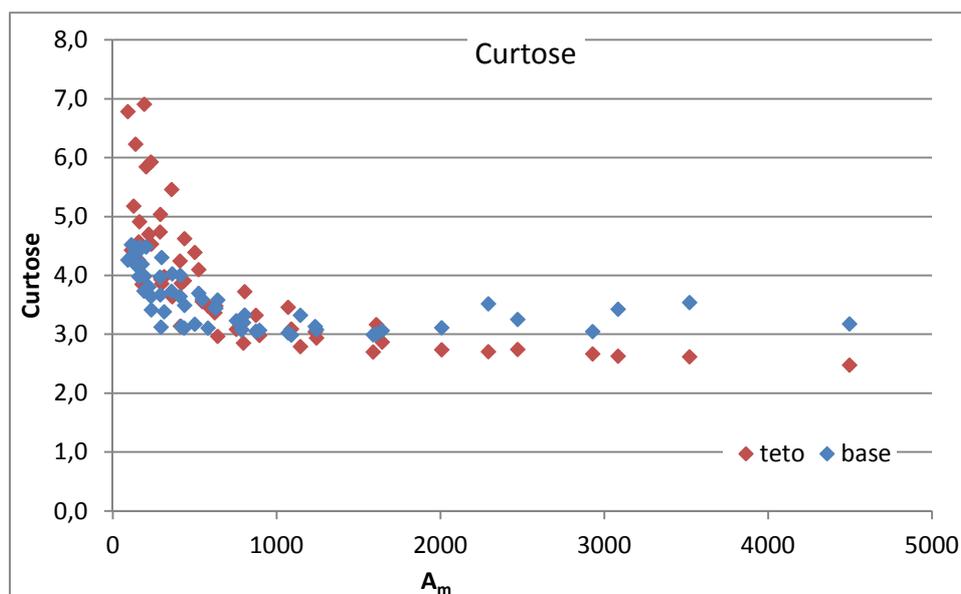


Figura 54. Distribuição do coeficiente de curtose para a base e teto do conduto para os pontos de pressões mínimas

4.1.6. Distribuição de probabilidade $P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$

As pressões $P_{1\%}$ e $P_{0,1\%}$ são aquelas que apresentam probabilidade de serem igualadas ou superadas em 99% e 99,9% do tempo respectivamente. Estas por sua vez são representativas dos valores mínimos negativos que ocorrem nas estruturas. O conhecimento destas pressões é essencial no dimensionamento das estruturas, pois, apesar de ocorrerem durante uma pequena parcela do tempo, atuam em operações contínuas ao longo da vida útil da eclusa, podendo vir a provocar danos às estruturas do teto ou da base do conduto.

A análise das Figura 55 e Figura 56 mostra o desenvolvimento do coeficiente de pressão $CP_{1\%}$ para a base e para o teto, respectivamente. Nestas figuras pode-se observar que para $A_m < 180$ e R_c entre 4,16 e 6,34 ocorreram pressões negativas na base, e para $A_m < 400$ e R_c entre 1,15 e 6,34, ocorreram pressões negativas no teto. A partir dos dados das Figura 55 e Figura 56 foi possível ajustar equações para a envoltória inferior, de maneira a se estimar os valores de pressões $P_{1\%}$ que podem ocorrer em diferentes condições de escoamento.

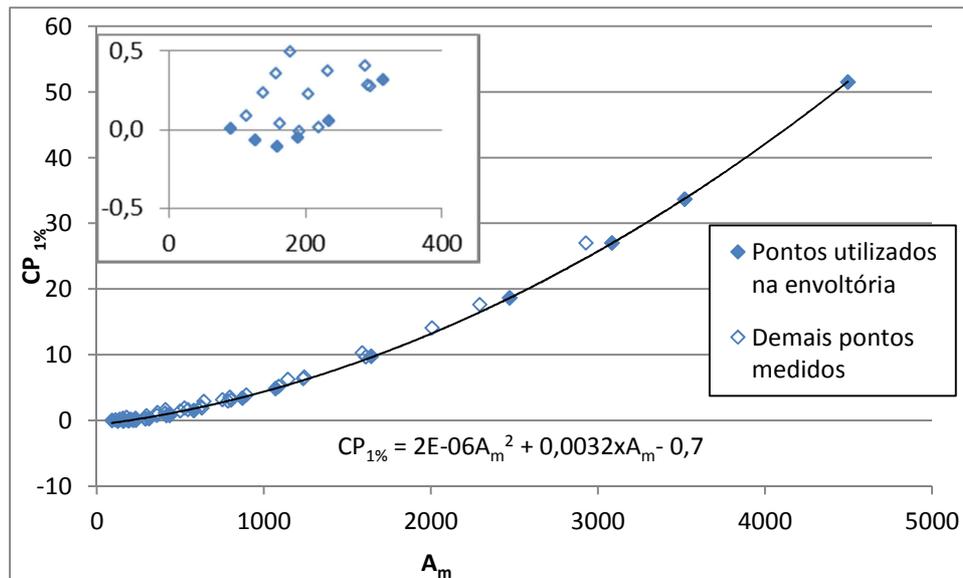


Figura 55. Distribuição do $CP_{1\%}$ para a base do conduto

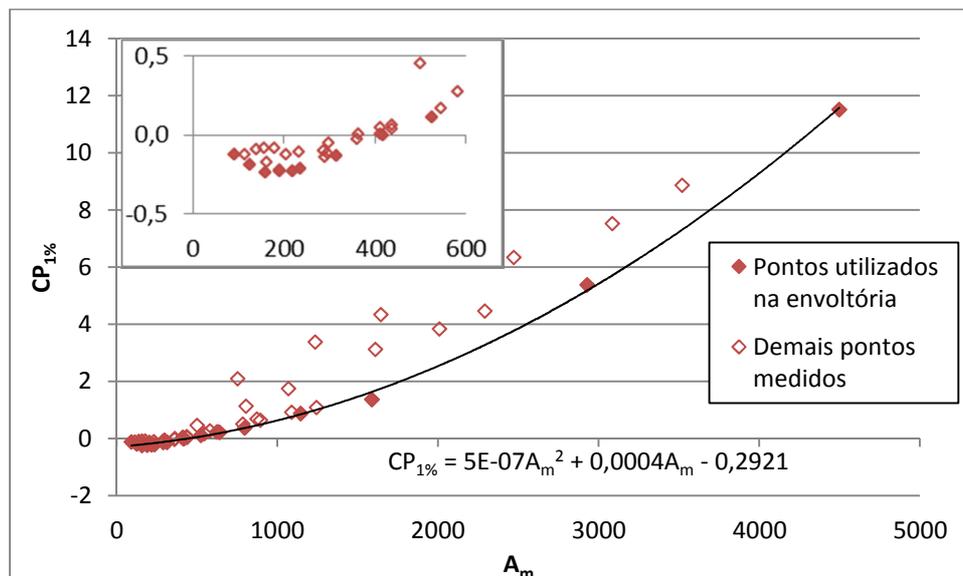


Figura 56. Distribuição do $CP_{1\%}$ para o teto do conduto

As Figura 57 e Figura 58 mostram o desenvolvimento do coeficiente de pressão $CP_{0,1\%}$. São observados valores negativos para $P_{0,1\%}$ na base quando, $A_m < 210$ e Rc está entre 3,81 e 6,30 e no teto quando $A_m < 440$ e Rc está entre 0,60 e 6,34. Estas análises indicam que há um maior risco de os danos nas estruturas serem maiores e começarem antes no teto do conduto.

O parâmetro A_m está associado à velocidade média do escoamento na “vena contracta” e à abertura, permitindo que se determine, para cada abertura, onde começarão a ocorrer pressões negativas.

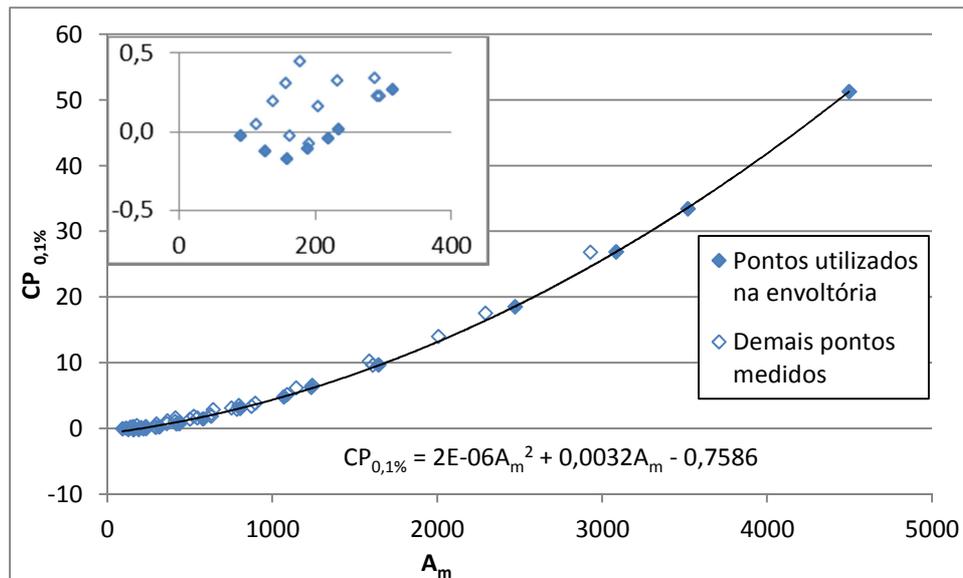


Figura 57. Distribuição do $CP_{0,1\%}$ para a base do conduto

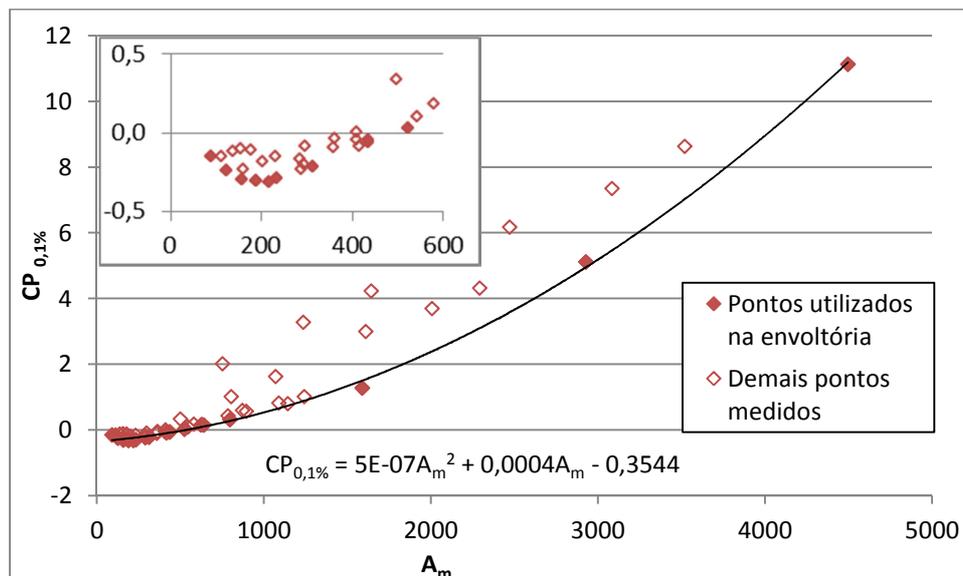


Figura 58. Distribuição do $CP_{0,1\%}$ para o teto do conduto

Diante do exposto nos itens 4.1.2 e 4.1.6 foi possível definir para o regime permanente as equações 13 até 18, com estas equações é possível estimar as pressões que ocorrem na base e teto do conduto:

* na base

$$P_{\text{média}} = (0,000002 \cdot A_m^2 + 0,0037 \cdot A_m - 0,5794) \cdot \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) \quad \text{equação 13}$$

$$P_{1\%} = (0,000002 * A_m^2 + 0,0032 * A_m - 0,7) * \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) \quad \text{equação 14}$$

$$P_{0,1\%} = (0,000002 * A_m^2 + 0,0032 * A_m - 0,7586) * \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) \quad \text{equação 15}$$

* no teto

$$P_{\text{média}} = (0,000005 * A_m^2 + 0,0006 * A_m - 0,2357) * \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) \quad \text{equação 16}$$

$$P_{1\%} = (0,000005 * A_m^2 + 0,0004 * A_m - 0,2921) * \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) \quad \text{equação 17}$$

$$P_{0,1\%} = (0,000005 * A_m^2 + 0,0004 * A_m - 0,3544) * \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) \quad \text{equação 18}$$

4.2. ANÁLISE EM REGIME TRANSITÓRIO

Inicialmente utilizaram-se os dados dos ensaios do item 3.2.2.1 para a determinação dos casos onde ocorrem as pressões extremas negativas, no caso do regime transitório. Feito isto, utilizou-se como ponto de partida os ensaios do item 3.2.2.2 e a análise desses ensaios será apresentada neste capítulo.

A Figura 59 apresenta a comparação entre as pressões no teto obtidas para as tomadas nas posições T5, T6 e T7 durante a abertura total da comporta, com velocidade de 3,6 mm/s. Observa-se que as 3 tomadas apresentam o mesmo tipo de comportamento, sendo que as tomadas T5 e T6, para este caso, apresentam valores muito próximos. Este mesmo comportamento ocorre também para a base.

Verifica-se também que a tomada na posição T6 apresenta as maiores flutuações de pressão. Este comportamento mostrou-se semelhante para todas as velocidades de abertura estudadas, com isso, limitou-se a análise em regime transitório com interrupção na posição T6.

Observa-se também que no regime transitório ocorrem pressões negativas para aberturas entre 30% e 70%, sendo que as menores pressões ocorreram entre 40% e 50%, diferentemente dos resultados para regime permanente, onde as pressões mínimas ocorreram sempre entre 20% e 40%, conforme mostrado no item 4.1.1.2.

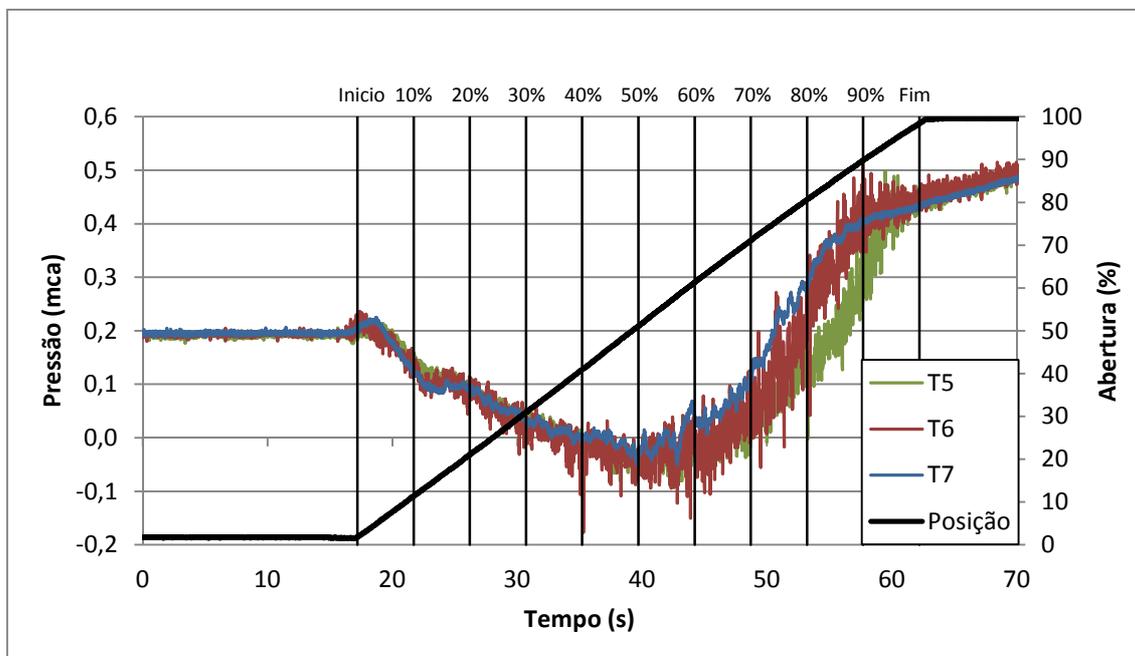


Figura 59. Comparação entre as posições T5, T6 e T7 no teto para abertura total e velocidades de abertura de 3,6mm/s e desnível H3 (0,80m)

A Figura 60 mostra a evolução da pressão instantânea para cada parada realizada, permitindo visualizar que:

- * o desenvolvimento durante o transitório para a abertura total passa pelas aberturas intermediárias, como era de se esperar;

- * as pressões são negativas para aberturas entre 30% e 70%, sendo que as menores ocorreram entre 40% e 50%;

- * as pressões mínimas ocorreram logo após a interrupção do movimento da comporta (exceto 70% e 80%);

- * existem picos de pressões negativas que não ocorrem para o caso da abertura ininterrupta e estão relacionados a pressões extremas com baixas probabilidades de ocorrência;

* comparando uma determinada abertura com a abertura anterior, pode-se afirmar que nos ensaios realizados com interrupção da abertura da comporta ocorrem pressões mínimas menores do que para o caso de uma abertura ininterrupta.

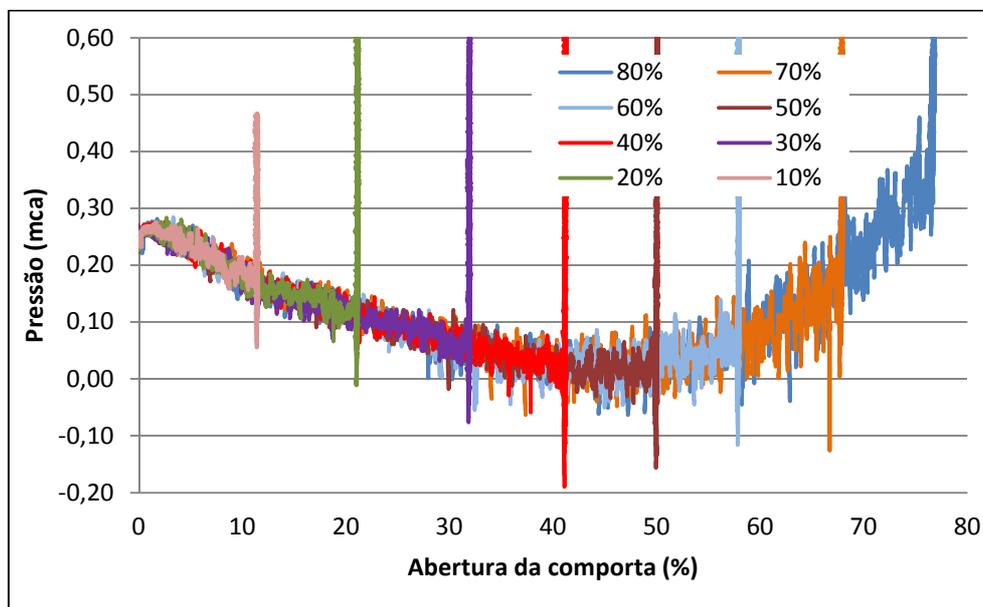


Figura 60. Desenvolvimento das pressões com interrupção na posição T6 no teto com velocidade de abertura de 3,6mm/s e desnível H3

As Figura 61 e Figura 62 mostram o comportamento das pressões ao longo do tempo na tomada T6 para diferentes aberturas de parada. As pressões para aberturas pequenas (10% e 20%) são maiores e crescem mais lentamente a partir do ponto de pressão mínima, e aberturas acima de 70% passam pelo valor de mínimo e crescem mais rapidamente. Mais uma vez é possível afirmar que para as aberturas entre 30% e 60% são verificadas as situações que ocorrem pressões mínimas menores.

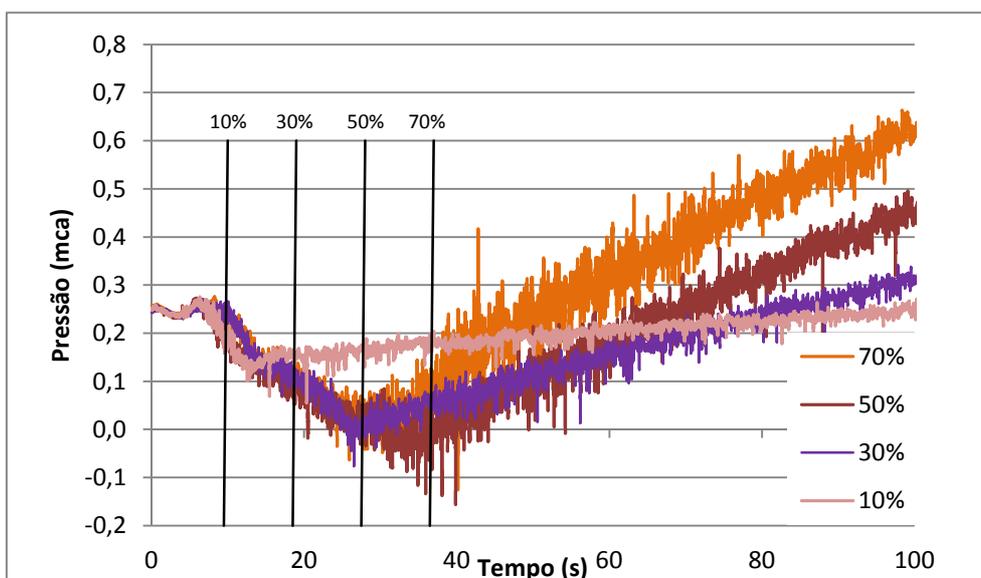


Figura 61. Pressões em regime transitório com interrupção para as aberturas de 10%, 30%, 50% e 70%, na posição T6 no teto do conduto

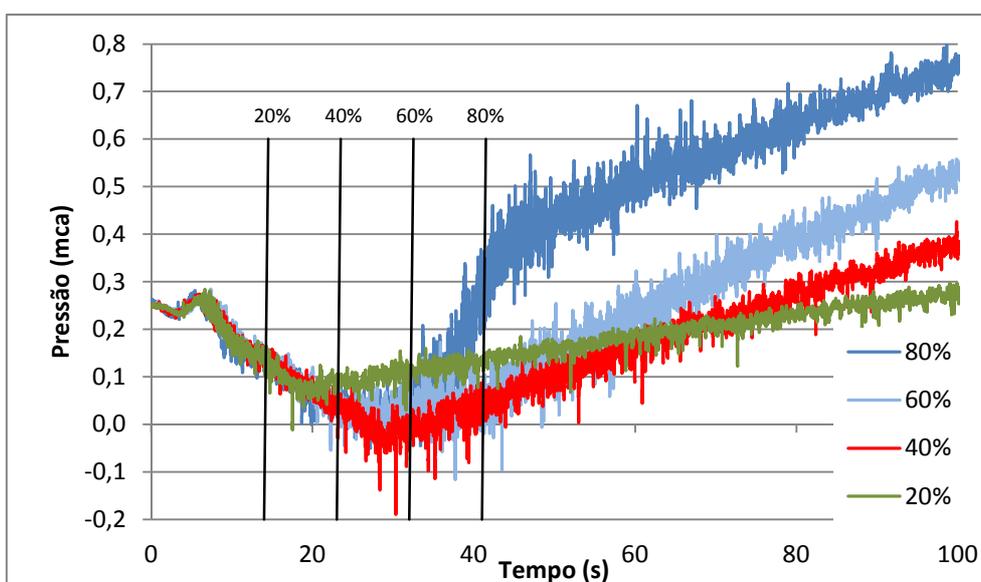


Figura 62. Pressões em regime transitório com interrupção para as aberturas de 20%, 40%, 60% e 80%, na posição T6 no teto do conduto

Como há interesse em se conhecer o que ocorre no momento em que a comporta no regime transitório passa por uma determinada abertura, utilizou-se como critério de análise os ensaios com parada. Outros critérios de análise poderiam ter sido utilizados, mas julgou-se que este seria mais representativo do que ocorre no momento da passagem da comporta por determinada abertura.

A utilização de ensaios com abertura contínua até 100% poderiam mascarar os resultados em função da dificuldade de se identificar o momento exato em que a comporta passaria por uma determinada abertura. Portanto, para se definir as pressões que ocorrem no regime transitório para uma determinada abertura, foram analisados os ensaios com parada (Figura 63), onde se identificou o momento da parada da comporta adotando-se como amostra das pressões, aquelas que ocorreram 0,5s antes e depois do ponto de parada da comporta.

Neste caso, o deslocamento da comporta antes da parada teria sido de aproximadamente 1,8mm e o efeito da subida do nível na câmara seria desprezível, estando dentro da faixa de erro dos transdutores (dependendo da abertura $\approx 0,1\text{mm}$ a $2,2\text{mm}$). Entretanto, como pode ser visto na Figura 63, que apresenta os resultados para uma abertura com interrupção em 40%, há uma diferença entre as pressões mínimas no ponto da parada da comporta e as pressões mínimas que ocorrem na amostra. As pressões mínimas da amostra sempre se situaram após a parada para aberturas menores que 60%. A partir de 60%, as pressões mínimas da amostra ocorreram antes da parada. É possível verificar também que a vazão está em ascensão no momento da parada da comporta, ou seja, as velocidades também estão aumentando neste instante.

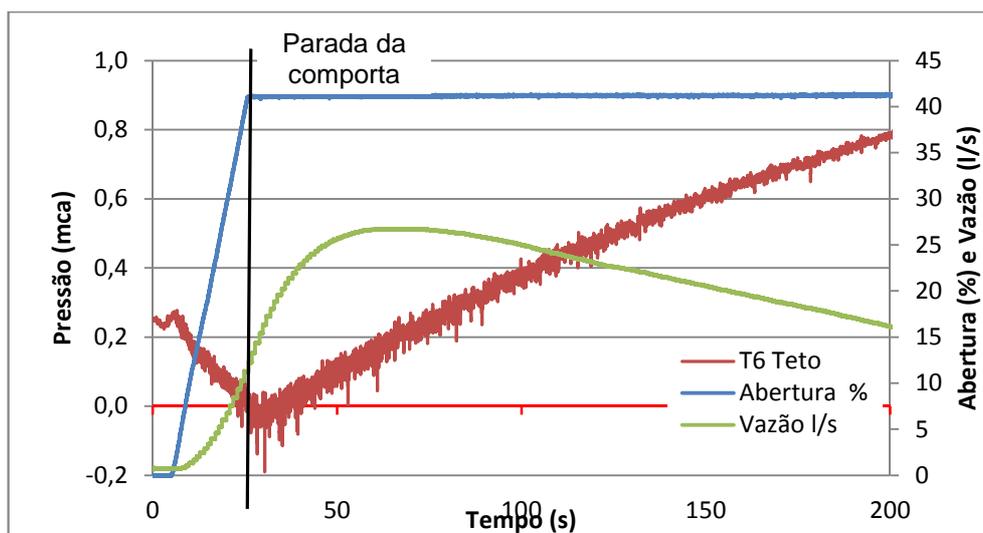


Figura 63. Enchimento com interrupção de abertura em 40% - posição T6 teto - velocidade 3,6 mm/s

A Tabela 5 apresenta um comparativo entre as pressões mínimas da amostra e na parada da comporta. Através da análise, observa-se que a variação máxima ocorreu para a abertura de 20%, foi 5 vezes menor que a pressão na parada e ocorreu 3,6 s antes da parada da comporta. A variação para a abertura de 80% foi maior, entretanto ocorreu antes da parada da comporta. As pressões mínimas ocorreram de 2,2s até 12,4s após a parada, e a relação entre as pressões variou de -150% até 600%. A ocorrência das pressões mínimas após a parada provavelmente se deve ao efeito transitório, pois no instante da parada as velocidades do escoamento estão em ascensão, conforme dito anteriormente.

Tabela 5. Comparação entre as pressões mínimas.

Abertura (%)	Pressão mínima na parada (amostra de 1 segundo)		Pressão mínima da amostra		Diferença entre os tempos (s)	Relação entre as pressões mínimas
	Tempo (s)	Pressão (mca)	Tempo (s)	Pressão (mca)		
10%	4,5	0,137	14,9	0,055	10,4	2,5
20%	9,0	0,049	12,6	-0,010	3,6	-5,0
30%	13,5	0,013	19,1	-0,076	5,6	-0,2
40%	18,0	-0,026	25,4	-0,190	7,4	0,1
50%	22,5	-0,06	34,9	-0,154	12,4	0,4
60%	27,0	-0,004	32,7	-0,114	5,7	0,04
70%	31,5	-0,125	33,7	-0,125	2,2	1,0
80%	36,0	0,396	23,2	-0,064	-12,8	-6,2

* Referenciado ao início da abertura

A Figura 64 apresenta as diferenças entre os coeficientes de pressões CP encontrados na parada e CP mínimo da amostra. Nesta figura pode-se verificar uma tendência de aumento da diferença entre os coeficientes de pressões próximo ao início e ao fim da abertura da comporta. Também é possível observar que os menores valores dos coeficientes de pressão mínima ficaram entre 40% e 50%, sendo que para 40% esse coeficiente ficou da ordem de -1,4, enquanto que o coeficiente de pressão no instante da parada ficou na ordem de 0,1, indicando uma variação de 14 vezes.

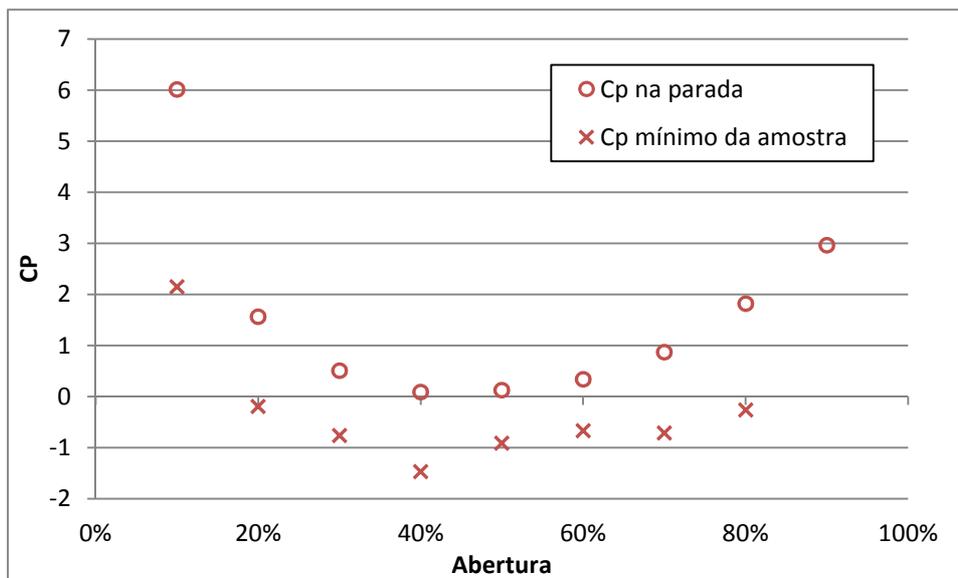


Figura 64. Comparativo entre as pressões mínimas na parada e mínimo da amostra na posição T6 teto velocidade 3,6mm/s

4.2.1. Pressões médias das amostras de um segundo

As pressões médias durante o regime transitório no momento em que a comporta passa por uma determinada abertura foram calculadas considerando o instante em que a operação da comporta é interrompida em cada uma das aberturas estudadas. Retirou-se então uma amostra de um segundo, utilizando como ponto central da amostra o instante da interrupção do movimento da comporta. Assim foi possível ter uma amostra “instantânea” para cada valor de abertura em intervalos de 10% em 10%, resultando em amostras com 100 dados. Esses valores foram considerados como representativos das pressões médias que ocorrem para aquela abertura. Também foi analisada qual seria a tendência no caso de a velocidade de abertura variar. Foram utilizadas leis de abertura com velocidades de 1,8 mm/s; 2,7 mm/s e 3,6 mm/s.

Na Figura 65 apresentam-se os resultados obtidos para a pressão média considerando uma amostra de 1s na base e teto para a posição T6. É possível notar uma pequena tendência de diminuição da pressão com o aumento da velocidade de abertura para as aberturas maiores que 30%. Com o aumento da velocidade de abertura, há uma tendência de valores mínimos ocorrerem em aberturas maiores. Entretanto, é necessário que se façam mais ensaios para que se possa concluir se este é um efeito da velocidade de abertura ou uma dispersão natural dos dados, que não é o foco nesta pesquisa. Nota-se

também que para as aberturas menores que 30%, as pressões são praticamente iguais.

A Figura 66 apresenta os mesmos dados da Figura 66, mas em forma de coeficiente de pressão adimensional (CP). Com isso, observa-se que:

- * os coeficientes mínimos ocorrem entre 40% e 60% de abertura;
- * a velocidade de abertura tem uma influência maior para aberturas menores que 40%; sendo as velocidades de abertura menores as que resultam em coeficientes de pressão menores;
- * para aberturas maiores que 30% no teto e maiores que 60% na base, os valores dos coeficientes são praticamente constantes independente da velocidade de abertura;
- * no teto há uma tendência dos coeficientes de pressão serem menores do que na base.

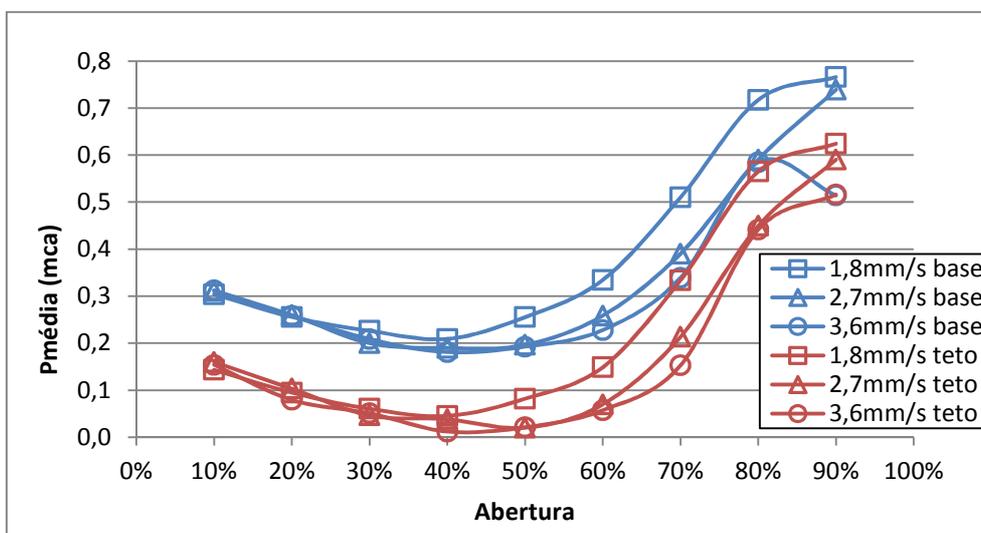


Figura 65. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para a pressão média

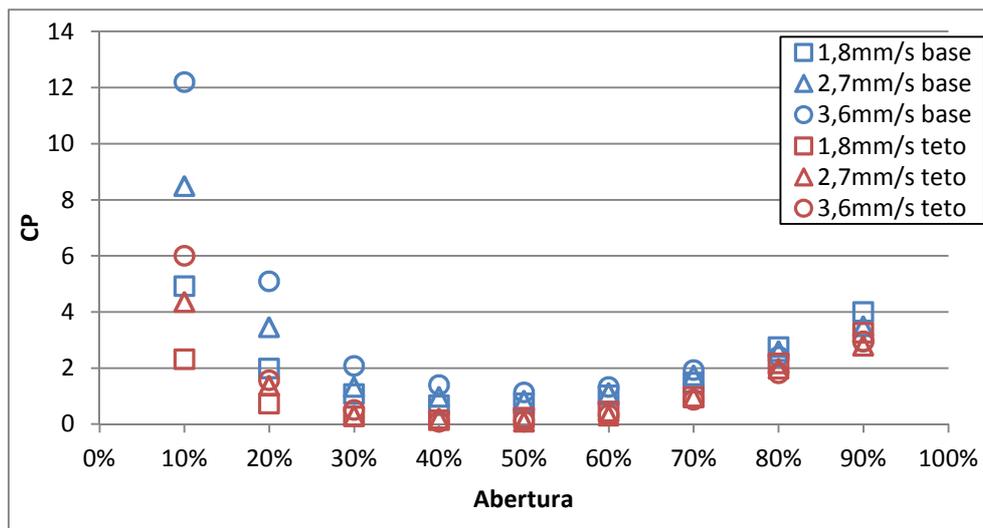


Figura 66. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para o coeficiente de pressão (CP)

4.2.2. Pressões $P_{1\%}$ e coeficientes de pressão $CP_{1\%}$ das amostras de um segundo

Os valores de pressão considerados como representativos das pressões mínimas para as amostras de um segundo, foram os valores de $P_{1\%}$, que ocorreram entre 0,5s antes da parada e 0,5s após a parada.

Da mesma maneira que se efetuou uma análise da influência da velocidade de abertura nas pressões, verificou-se qual seria a influência na pressão $P_{1\%}$. Pela Figura 67 verifica-se que para as aberturas menores que 50%, a diferença nas pressões é menor, e para aberturas maiores que 50%, estas diferenças aumentam. Com o aumento da velocidade de abertura, há uma tendência dos valores mínimos ocorrerem em aberturas maiores, tanto no teto quanto na base, valores estes, entre 40 e 70%. Entretanto, é necessário que se façam mais ensaios para que se possa concluir se este é um efeito da velocidade de abertura ou uma dispersão natural dos dados.

Para as pressões $P_{1\%}$ (Figura 67), nota-se uma pequena diferença para a velocidade de abertura de 1,8mm/s; estas são ligeiramente maiores que as demais. Para as velocidades de abertura de 2,7mm/s e 3,6mm/s, as pressões $P_{1\%}$ têm valores muito próximos, não sendo possível uma distinção de qual o pior caso.

Na Figura 68 apresentam-se os mesmos dados, mas de maneira adimensionalizada como coeficiente de pressão ($CP_{1\%}$). Com isso, observa-se que:

* os coeficientes mínimos negativos podem ocorrer entre 40% e 60% de abertura;

* a velocidade de abertura tem uma influência maior para aberturas menores que 30%; sendo as velocidades de abertura menores as que resultam em coeficientes de pressão menor;

* para aberturas maiores que 30% no teto e maiores que 40% na base, os valores dos coeficientes são praticamente constantes, independente da velocidade de abertura;

* no teto há a tendência dos coeficientes de pressão serem menores do que na base.

Os valores obtidos para as outras posições e situações estão apresentados nas Tabelas em Anexo.

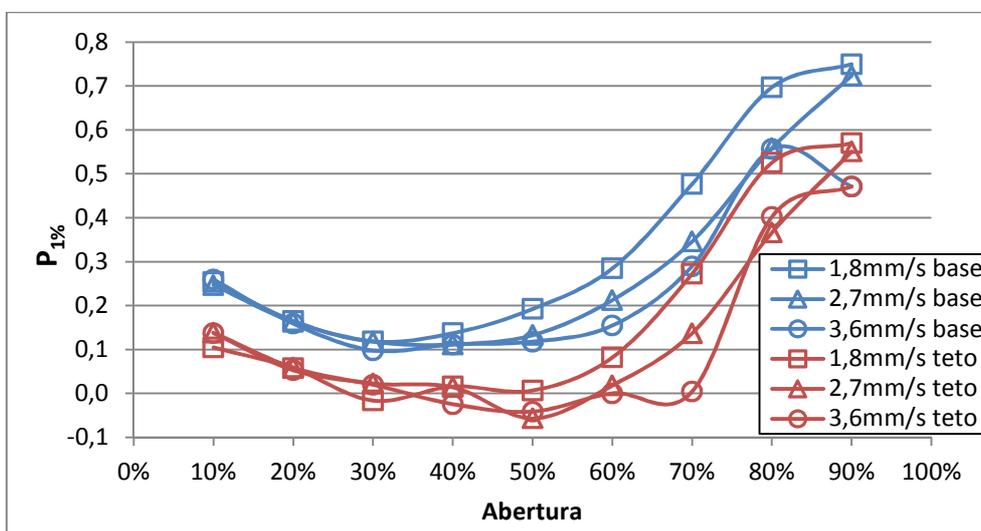


Figura 67. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para a pressão $P_{1\%}$

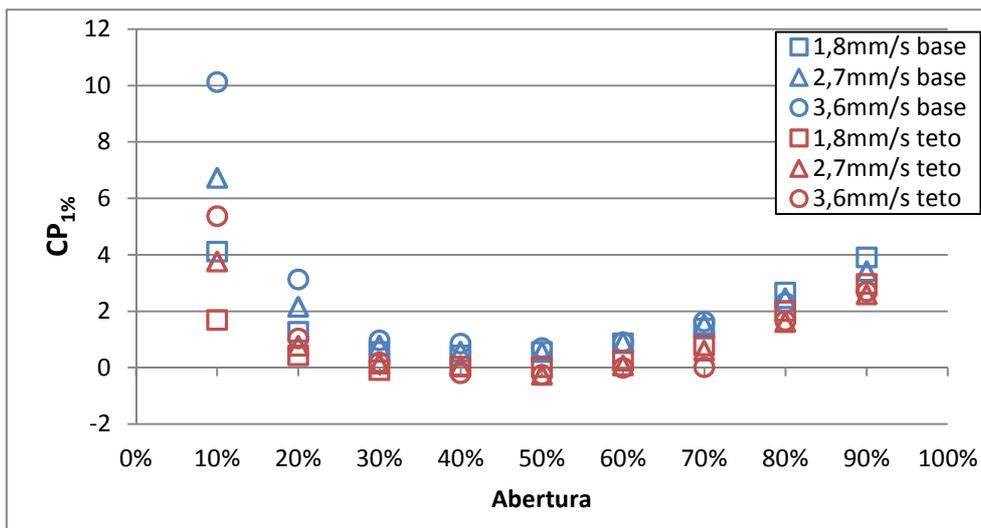


Figura 68. Comparativo entre o teto e a base para a posição T6 em função da variação de velocidade na abertura para o coeficiente de pressão $CP_{1\%}$

4.3. COMPARATIVO ENTRE AS PRESSÕES EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

Para se comparar as pressões extremas mínimas entre o regime permanente e transitório, foram efetuadas duas análises:

a) comparação entre o regime permanente e o regime transitório com parada - esta situação pode ser considerada quando se está analisando uma lei de operação contínua na comporta e se quer utilizar os dados obtidos em regime permanente.

b) comparação entre o que ocorre no regime transitório com parada no instante da passagem por uma determinada posição e após a parada. Esta situação pode ser considerada quando se está analisando uma lei de operação com parada da comporta por um tempo em uma determinada posição.

4.3.1. Comparativo entre as pressões em regime permanente e transitório no instante da passagem por uma abertura

A Tabela 6 apresenta os valores das pressões com $P_{1\%}$ obtidas em regime permanente ($P_{1\%}RP$) e em regime transitório com parada para o instante da parada ($P_{1\%}RTP$). Essa comparação permite estimar quais serão as pressões com 1% de probabilidade de ocorrência para o caso de leis lineares

de abertura da comporta e de maneira contínua. A Figura 69 apresenta a relação entre os coeficientes de pressão $CP_{1\%}$ para a condição de abertura com parada no instante da parada ($CP_{1\%RTP}$) e em regime permanente ($CP_{1\%RP}$). Observa-se que os valores de $CP_{1\%RTP}$ apresentaram a tendência de serem inferiores aos de $CP_{1\%RP}$ para aberturas compreendidas entre 35% e 65%, sendo que para a abertura de 50% a diferença foi da ordem de -10 vezes.

Tabela 6. Comparativo entre os valores de $CP_{1\%RTP}$ e $CP_{1\%RP}$

Abertura	Vazão	$P_{1\%RTP}$	$CP_{1\%RTP}$	$P_{1\%RP}$ (*)	$CP_{1\%RP}$ calculado	Relação entre as pressões ($CP_{1\%RTP} / CP_{1\%RP}$)
10%	1,5	0,13748	5,36957	0,00238	0,09304	57,71
20%	3,8	0,05262	1,03747	0,00485	0,09565	10,85
30%	7,6	0,01956	0,19574	0,00283	0,02830	6,92
40%	11,4	-0,02457	-0,18978	0,00450	0,03477	-5,46
50%	16,8	-0,04138	-0,24522	0,00430	0,02545	-9,63
60%	21,4	0,00011	0,00062	0,01121	0,06569	0,01
70%	27,3	0,00407	0,02316	0,01728	0,09829	0,24
80%	40,6	0,40189	1,65857	0,01216	0,05020	33,04

Os valores de $CP_{1\%RP}$ foram calculados a partir da equação a seguir:

$$CP_{1\%RP} = 5E^{-07}A_m^2 + 0,0004A_m - 0,2921 \quad \text{equação 19}$$

onde:

$CP_{1\%RP}$ = coeficiente de pressão $CP_{1\%}$ para a situação de abertura em regime permanente;

A_m = parâmetro adimensional.

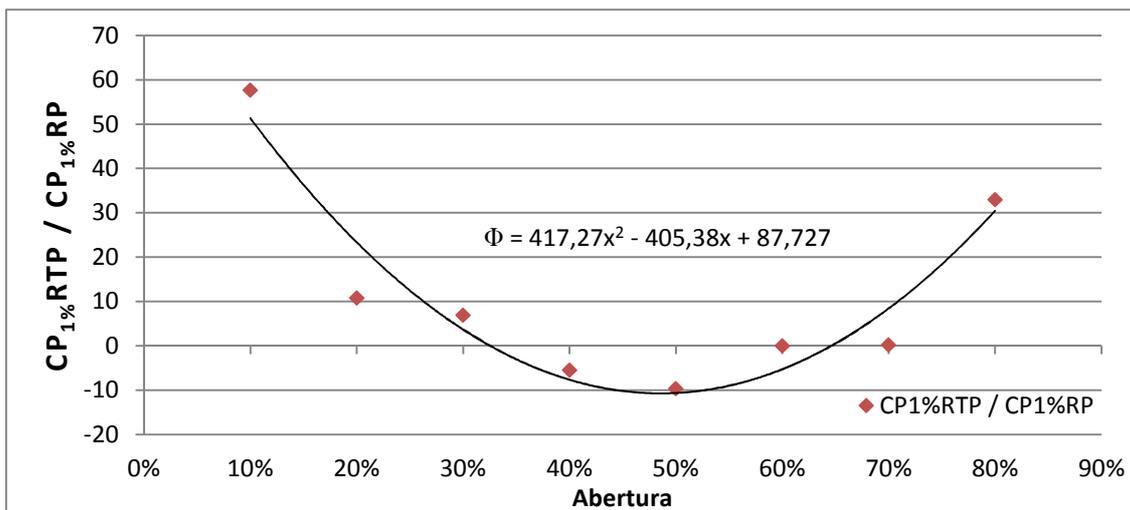


Figura 69. Relação entre os coeficientes de pressão CP_{1%}RTP e CP_{1%}RP.

Para calcular os valores de pressão mínima com parada, sugere-se a equação 20, entretanto, para intervalos menores que 35% e maiores que 70%, sugere-se que se utilize o fator de correção (Φ) igual a 1:

$$\frac{CP_{1\%}RTP}{CP_{1\%}RP} = \Phi \quad \text{equação 20}$$

se $a \leq 35\% \Rightarrow \Phi = 1$

se $35\% < a < 70\% \Rightarrow \Phi = 417a^2 - 405,38a + 87,727$

se $a \geq 70\% \Rightarrow \Phi = 1$

4.3.2. Comparativo entre as pressões em regime transitório no instante da passagem por uma abertura e a pressão mínima amostral

A Tabela 7 apresenta os valores das pressões P_{1%}RTP e as pressões mínimas obtidas durante esta operação (P_{mín}RTP). Observa-se que as pressões mínimas (P_{mín}RTP) sempre são negativas (exceto 10%) e menores que (P_{1%}RTP). Esta comparação permite estimar qual será a pressão mínima para cada abertura no caso de uma operação com parada.

Tabela 7. Comparativo entre os valores de $CP_{1\%RTP}$ e $CP_{\min}RTP$.

Abertura	Vazão	$P_{1\%RTP}$	$CP_{1\%RTP}$	$P_{\min}RTP$	$CP_{\min}RTP$	Diferença entre $CP_{1\%RTP}$ e $CP_{\min}RTP$
10%	1,5	0,13748	5,36957	0,05504	2,1496	-3,22
20%	3,8	0,05262	1,03747	-0,00983	-0,1938	-1,23
30%	7,6	0,01956	0,19574	-0,07588	-0,7592	-0,95
40%	11,4	-0,02457	-0,18978	-0,18970	-1,4651	-1,28
50%	16,8	-0,04138	-0,24522	-0,15358	-0,9101	-0,66
60%	21,4	0,00011	0,00062	-0,11366	-0,6663	-0,67
70%	27,3	0,00407	0,02316	-0,12531	-0,7126	-0,74
80%	40,6	0,40189	1,65857	-0,06353	-0,2622	-1,92

A Figura 70 apresenta a relação entre a diferença dos coeficientes de pressão $CP_{1\%RTP}$ e $CP_{\min}RTP$. Observa-se que as diferenças em módulo diminuem à medida que a abertura aumenta até a abertura em torno de 50%, para depois aumentarem novamente. Para aberturas maiores que 50%, o ponto de mínimo situa-se em torno da abertura de 50%. A diferença pode ser estimada pela equação a seguir:

$$CP_{\min}RTP = CP_{1\%RTP} + \Omega \quad \text{equação 21}$$

onde:

$CP_{\min}RTP$ = coeficiente de pressão mínima para a situação de abertura da comporta com parada;

$CP_{1\%RTP}$ = coeficiente de pressão $CP_{1\%}$ para a situação de abertura da comporta com parada;

Ω = coeficiente de correção para a pressão mínima, dado pela seguinte equação:

$$\Omega = -13,92a^2 + 14,081a + 4,1206 \quad \text{equação 22}$$

se $10\% \leq a \leq 80\%$

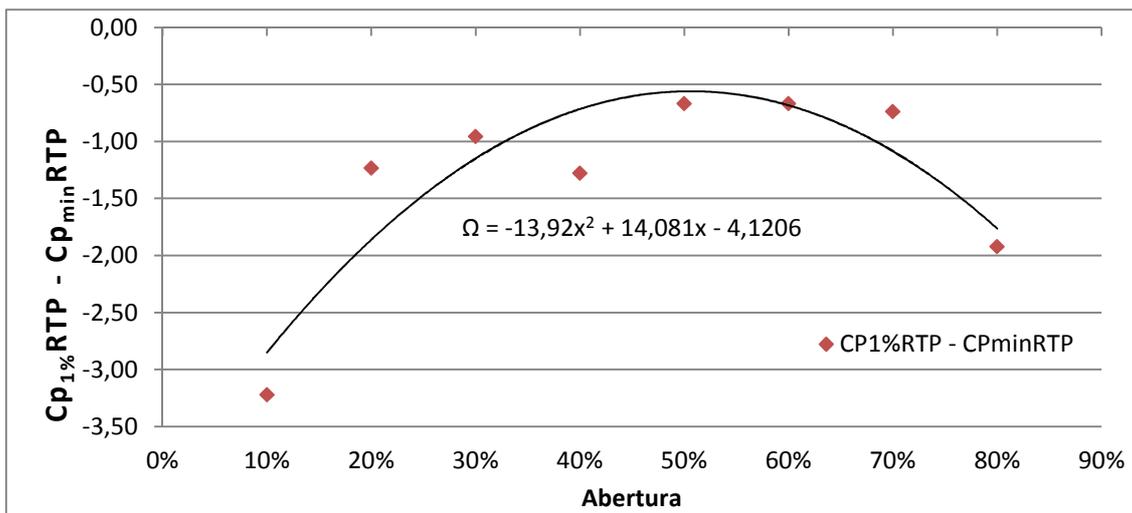


Figura 70. Diferença entre os coeficientes de pressão CP_{minRTP} e $CP_{1\%RTP}$.

5. CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa, analisar as pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida em eclusas de navegação e desenvolver critérios para estimativa destas pressões a partir de estudo em modelo hidráulico reduzido.

Nesta pesquisa foi dada ênfase às pressões médias e extremas mínimas, pois estas são as de maior importância devido a serem diretamente responsáveis pela possível formação de erosão e cavitação a jusante da comporta.

Foram analisadas 2 situações distintas para determinação das pressões mínimas a jusante da comporta:

* escoamento em regime permanente:

* escoamento em regime transitório com parada da comporta:

Como conclusão foi possível observar que:

A) Escoamento em regime permanente:

- Distribuição longitudinal das pressões médias passa por um mínimo logo após a comporta em uma distância inferior a 3 vezes a altura do conduto;
- Para uma mesma vazão, aberturas menores levam a menores pressões médias mínimas;
- Para uma mesma abertura, maiores vazões levam a menores pressões médias mínimas;
- As pressões no teto são sempre inferiores às pressões na base para uma mesma vazão e abertura;

- As pressões médias mínimas tendem a ocorrer na base para valores de abertura entre 20% e 40%, enquanto que para o teto, ocorrem entre 10% e 50%;
- O coeficiente de pressão média mínima CP_{\min} para o teto do conduto apresenta valores negativos quando A_m é menor que 300 e R_c está entre 1,61 e 6,34;
- O coeficiente de pressão $CP_{1\%}$, apresenta valores negativos na base para $A_m < 180$ e para R_c entre 4,16 e 6,34 e no teto para $A_m < 400$ e para R_c entre 1,15 e 6,34;
- Podem-se estimar as pressões médias mínimas e as com probabilidade de 1% ($P_{1\%}$) a partir do parâmetro A_m ; este está associado a velocidade média do escoamento na “vena contracta” e na abertura, permitindo que se determine para cada abertura onde começarão a ocorrer as pressão negativas;
- As flutuações de pressão máximas para o teto e base dos condutos ocorrem em uma região próxima de 2 vezes a altura do conduto (medido a partir da comporta), e decrescem rapidamente para jusante.
- As flutuações de pressão são sempre maiores na base do que no teto do conduto;
- As flutuações de pressão máximas ocorrem em pontos diferentes de onde ocorrem as pressões mínimas;
- Através da análise dos coeficientes de assimetria e curtose, foi possível verificar que a distribuição das pressões na região de influência da comporta não segue um comportamento semelhante ao de uma distribuição normal, uma vez que estes valores são diferentes de zero para assimetria e de três para curtose (exceto na região próxima ao adimensional $A_m = 1000$);
- Apesar das pressões médias na base serem sempre positivas, a análise das pressões extremas indica que existem pressões negativas com

baixa probabilidade de ocorrência. Estas aliadas a extensos tempos de funcionamento da estrutura podem também causar danos;

B) Escoamento em regime transitório:

- Com o aumento da velocidade de abertura, as pressões mínimas diminuem, ou seja, ocorrem situações mais críticas;
- As pressões mínimas negativas ocorrem para aberturas entre 30% e 70%, sendo os valores menores entre 40% e 50%;
- Aberturas constantes tendem a ter pressões maiores que aberturas com interrupção;
- Nas situações com interrupção do movimento da comporta, as pressões mínimas ocorrem depois da interrupção.

C) comparação entre o escoamento em regime permanente e transitório

- O comportamento das pressões mínimas para regime transitório e permanente é distinto, sendo que para o regime permanente, as pressões mínimas ocorrem para aberturas menores, entre 20% e 40%, e para regime transitório, entre 30% e 70%;
- A análise das pressões em regime permanente são válidas apesar de diferente do regime transitório;
- Utilizando os dados em regime permanente, pode-se estimar qual seria a pressão mínima em um regime transitório.

Esta pesquisa procurou determinar as pressões mínimas que ocorrem à jusante de comportas em eclusas de navegação e verificar quais as diferenças entre as pressões em regime permanente e transitório e a possibilidade de utilizar os resultados do regime permanente (que são de execução mais fácil). A partir da análise das pressões mínimas em regime transitório e foram mostradas as diferenças que existem nestes dois regimes de maneira a orientar trabalhos futuros.

6. RECOMENDAÇÕES

O escoamento a jusante de comportas tanto em regime permanente como em regime transitório é complexo, de difícil execução e análise, em função dos fenômenos e do número de variáveis envolvidos, que exigem para o estudo estruturas de certo porte e funcionamento complexo.

A presente pesquisa mostrou o comportamento das pressões a jusante de uma comporta tipo segmento invertida de uma forma geral, dando ênfase às pressões médias e extremas mínimas, que são responsáveis por problemas de erosão e cavitação neste tipo de estrutura, tanto para escoamento em regime permanente como em transitório. Esta pesquisa procurou indicar as diferenças que ocorrem nas pressões mínimas para os 2 tipos de escoamento. Entretanto, existem no tipo de análise efetuada diversas limitações:

- * tipo da estrutura analisada (seção quadrada) e
- * faixa de carga analisadas.

De forma a orientar possíveis trabalhos futuros, segue uma lista de recomendações embasadas no conhecimento adquirido e também em algumas dificuldades encontradas no decorrer do mesmo. Como recomendações, tem-se:

A) Recomendações gerais:

- utilização de um maior número de pontos de medição para que seja possível evidenciar com maior grau de certeza o ponto mínimo de flutuação de pressão média, de pressão extrema ($P_{1\%}$) e de máxima flutuação de pressão em todas situações estudadas (regime permanente e transitório);
- utilização de modelos em diferentes escalas com o objetivo de estudar os efeitos de escala;
- estudo de outros tipos de geometria dos condutos;

- estudo de outras geometrias de comporta.

B) Recomendações para estudo em regime permanente:

- estudar mais detalhadamente as flutuações de pressão;
- variar as cargas a jusante, mantendo a mesma carga a montante;
- tentar correlacionar os valores do nível da câmara com as aberturas para que seja possível obter resultados mais próximos, quando comparados com regime transitório.

C) Recomendações para estudos em regime transitório:

- estudar situações com parada, mas que possam manter o nível na câmara a jusante e se efetuar medições até o escoamento entrar em regime permanente. Nesses casos se teria a situação mais desfavorável para as pressões mínimas para cada abertura;
- estudar situações com abertura contínua;
- estudar outros tipos de leis de abertura para os ensaios em regime transitório (leis não lineares);
- estudar outros tipos de geometria dos condutos;
- efetuar um número maior de ensaios com repetibilidade para se obter coeficientes Φ e Ω mais consistentes

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATTISTON, C. C. **Estudo de escoamento a jusante de válvulas de eclusa, visando à supressão de cavitação sem adição de ar.** Exame de qualificação, Projeto de Tese de Doutorado UFRGS, Porto Alegre, 2008.

BRACIER, Comitê Brasileiro da CIER, Notícias, Disponível em: < <http://www.bracier.org.br> >, 2012.

BRIGHETTI, G.; DOURADO, C. L., **Aplicações e usos da medição de pressões em modelos de eclusas de navegação.** An. EPUSP, São Paulo, 1 (série A, pt3):51-62, 1988.

DAVIS, J. P.; MURPHY, T. E. **Experimental research on tock hydraulic systems.** J. Waterways and Harbors Div., ASCE 1966, 92 (WW1): 17-29.

DAVIS, J. P. **Hydraulic Design of Navigation Locks.** Miscellaneous Paper HL-89-5, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1989.

DOURADO, C. L. **Aplicações e usos da medição de pressões em modelos de eclusas de navegação.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

ELETRONORTE, Eclusa de Tucuruí, Imagens da Obra, Disponível em: < <http://www.eln.gov.br> >, 2010.

ENDRES, L. A. M. **Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 104 p., 1990.

GONTIJO, N. T.; CAMPOS, R. G. D. **Estruturas Hidráulicas Seminário: eclusas.** Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e

Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 29 f., 2005.

GREIN, H.; WYSS, E. ***Cavitation - and overview***, Sulzer Research Number, Zurich, 1974.

HWANG, N. H. C. ***Fundamentos de Sistemas de Engenharia Hidráulica - Cap.3*** - Ed. Php do Brasil, Rio de Janeiro, 1984.

KEMPKA, M. ***Determinação das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida: aplicação em eclusas de navegação***. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

KHATSURIA, R. M. ***Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators***. 3rd. New York. Marcel Dekker. 2005.

KNAPP, R. T.; DAILY, J. W.; HAMMITT, F. G. ***Cavitation***. MacgrawHill: New York, 1970.

LIN, C. H.; YEN, J. F.; TSAI, C. T. ***Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition***. Journal of irrigation and drainage Engineering, 2002.

MARQUES, M. G. ***Nouvelle Approche Pour le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge***. Tese de Doutorado - Québec, Canadá: Tese apresentada a Faculte des sciences et génie de la Université Laval, 221 p., 1995.

MEES, A. A. A.; BATTISTON, C. C.; MARQUES, M. G. ***Downstream flow from reverse Tainter gates in conduits as a hydraulic jump***. In: 2nd International Junior Researcher and Engineer Workshop on hydraulic Structures, 2008, Pisa. 2nd Internacional Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, 2008.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, ***Diretrizes da política nacional de transporte hidroviário***. Brasília, 2010.

OLIVEIRA, D. T.; GOMES, P. M. L.; REIS, L. F. B. **Considerações sobre alguns resultados obtidos no modelo físico da eclusa 1 de Tucuruí.** Simpósio Luso - Brasileiro sobre Simulação e Modelação Hidráulica. Blumenau-SC, 1983.

PINHEIRO, A. A. N. **Ações Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacia de Dissipação de Energia por Ressalto Hidráulico.** Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Lisboa. 1995.

PLEC, D. F. **Otimização de Leis de Manobras de Comportas de Eclusas de Navegação com Uso de Algoritmos Genéticos,** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

QINQIN, X. **Experimental research results for hydraulic design of high-lift lock culvert valves.** XXXI IAHR Congress, Seoul, 2005.

SANTOS, S. R. **Projeto hidráulico de eclusas de alta queda.** Texto para obtenção do título de professor livre docente. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

SANTOS, S. R. **Profundidade mínima em eclusas de navegação interior- estudo em modelo reduzido.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SENTÜRK. F. **Hydraulics of Dams and Reservoirs.** Highlands Ranch, USA. P.O.Box260026. 1994

SHARMA, H.R., **Air-entrainment in high head gated conduits.** Journal of HydraulicDivision, Nov.1976.

SMITH, C.D., CHEN, W., **The hydraulic jump in a steeply sloping square conduit,** Journal of Hydraulic Research. 27(3), 1989.

SPIEGEL, M. R. **Estatística,** Terceira Edição, Makron Books, 1993;

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

TRIERWEILER, E. F. N. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submersão**, Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

TULLIS, J. P. **Cavitação em sistemas hidráulicos**. Intercâmbio internacional sobre transientes hidráulicos & cavitação. São Paulo, 1982.

TULLIS, J. P.; Marschner, B. W. **A review of cavitation research on valves**, J. Hydraul. Div., ASCE, Proc. Paper 5705, January 1968.

USACE, UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Hydraulic Design of Lock Culverts**. EM 1110-2-1610. 1975.

USACE, UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Lake Red Rock**. Image Gallery. 2010.

USSAMI, H., **Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1980.

USSAMI, H., CANHOLI, A.P., CORADINI, L. **O emprego de modelo reduzido no projeto de eclusas de navegação**. Simpósio Luso-brasileiro Sobre Simulação e modelação Hidráulica. Blumenau, 1983 a.

USSAMI, H., CORADINI, L., CANHOLI, A.P., **Aplicações da modelagem matemática em sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas**. Simpósio Luso-brasileiro Sobre Simulação e modelação Hidráulica. Blumenau, 1983 b.

ANEXOS

Tabela 8. Valores de pressão obtidos para a base do conduto em regime transitório com parada

Pressões na base para velocidade de abertura 1,8 mm/s																
Abertura (%)	Vazão (l/s)	Pressão média (mca)			Pressão máxima (mca)			Pressão mínima (mca)			Flutuação de pressão (mca)			P _{1%} (mca)		
		T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7
10	2,25	0,329	0,304	0,288	0,444	0,378	0,339	0,158	0,241	0,228	0,044	0,029	0,027	0,218	0,254	0,230
20	6,01	0,283	0,256	0,273	0,402	0,351	0,354	0,138	0,158	0,190	0,048	0,045	0,036	0,177	0,165	0,206
30	11,06	0,255	0,226	0,241	0,343	0,399	0,340	0,191	0,101	0,165	0,028	0,050	0,037	0,199	0,118	0,182
40	17,63	0,247	0,209	0,234	0,294	0,284	0,331	0,217	0,136	0,146	0,017	0,033	0,036	0,219	0,137	0,158
50	23,87	0,292	0,255	0,304	0,333	0,329	0,409	0,260	0,187	0,212	0,014	0,032	0,036	0,261	0,192	0,217
60	29,48	0,375	0,334	0,389	0,395	0,391	0,465	0,353	0,283	0,323	0,011	0,025	0,032	0,355	0,285	0,329
70	38,07	0,526	0,510	0,573	0,547	0,552	0,600	0,493	0,463	0,547	0,011	0,017	0,014	0,503	0,477	0,548
80	42,14	0,703	0,717	0,745	0,718	0,739	0,758	0,684	0,693	0,729	0,008	0,009	0,007	0,685	0,697	0,729
90	42,41	0,756	0,766	0,771	0,776	0,790	0,790	0,733	0,747	0,753	0,009	0,009	0,007	0,735	0,750	0,759
Pressões na base para velocidade de abertura 2,7 mm/s																
Abertura (%)	Vazão (l/s)	Pressão média (mca)			Pressão máxima (mca)			Pressão mínima (mca)			Flutuação de pressão (mca)			P _{1%} (mca)		
		T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7
10	1,73	0,343	0,311	0,312	0,470	0,380	0,391	0,205	0,242	0,254	0,041	0,028	0,028	0,254	0,247	0,273
20	4,59	0,289	0,260	0,275	0,404	0,428	0,369	0,185	0,125	0,203	0,045	0,043	0,034	0,188	0,163	0,209
30	9,34	0,235	0,200	0,215	0,298	0,309	0,346	0,187	0,113	0,128	0,022	0,041	0,044	0,194	0,118	0,129
40	13,96	0,229	0,190	0,201	0,287	0,294	0,297	0,189	0,106	0,129	0,021	0,039	0,038	0,192	0,111	0,135
50	19,73	0,249	0,196	0,234	0,317	0,287	0,344	0,216	0,126	0,140	0,018	0,034	0,043	0,220	0,133	0,149
60	24,88	0,310	0,259	0,303	0,333	0,305	0,369	0,282	0,207	0,218	0,012	0,023	0,036	0,284	0,212	0,223
70	30,83	0,411	0,390	0,453	0,452	0,432	0,501	0,383	0,343	0,417	0,013	0,019	0,018	0,385	0,346	0,425
80	39,29	0,568	0,590	0,628	0,586	0,624	0,644	0,548	0,557	0,608	0,008	0,012	0,008	0,551	0,558	0,609
90	44,56	0,731	0,739	0,736	0,750	0,760	0,752	0,719	0,718	0,722	0,007	0,009	0,006	0,719	0,723	0,723
Pressões na base para velocidade de abertura 3,6 mm/s																
Abertura (%)	Vazão (l/s)	Pressão média (mca)			Pressão máxima (mca)			Pressão mínima (mca)			Flutuação de pressão (mca)			P _{1%} (mca)		
		T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7
10	1,45	0,331	0,312	0,301	0,429	0,371	0,368	0,244	0,232	0,255	0,040	0,025	0,022	0,266	0,259	0,257
20	3,77	0,285	0,258	0,278	0,474	0,363	0,379	0,164	0,138	0,223	0,056	0,041	0,029	0,183	0,159	0,224
30	7,63	0,243	0,209	0,232	0,334	0,355	0,402	0,168	0,093	0,135	0,032	0,050	0,062	0,178	0,098	0,142
40	11,42	0,218	0,181	0,210	0,274	0,262	0,300	0,183	0,102	0,118	0,017	0,036	0,042	0,183	0,111	0,129
50	16,76	0,230	0,192	0,236	0,290	0,328	0,369	0,184	0,107	0,133	0,021	0,041	0,052	0,194	0,118	0,150
60	21,35	0,283	0,228	0,277	0,320	0,303	0,336	0,248	0,152	0,213	0,013	0,029	0,032	0,249	0,154	0,213
70	27,28	0,373	0,339	0,402	0,414	0,385	0,454	0,326	0,287	0,342	0,016	0,023	0,029	0,343	0,289	0,344
80	40,62	0,562	0,585	0,622	0,582	0,612	0,646	0,544	0,553	0,597	0,008	0,012	0,009	0,546	0,556	0,598
90	40,45	0,456	0,514	0,513	0,514	0,552	0,540	0,407	0,399	0,471	0,026	0,022	0,014	0,413	0,471	0,477

Tabela 9. Valores de pressão obtidos para o teto do conduto em regime transitório com parada

Pressões no teto para velocidade de abertura 1,8 mm/s																
Abertura (%)	Vazão (l/s)	Pressão média (mca)			Pressão máxima (mca)			Pressão mínima (mca)			Flutuação de pressão (mca)			P _{1%} (mca)		
		T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7
10	2,25	0,154	0,143	0,120	0,169	0,170	0,166	0,139	0,103	0,059	0,005	0,014	0,026	0,141	0,105	0,073
20	6,01	0,103	0,095	0,097	0,118	0,117	0,138	0,084	0,038	0,060	0,008	0,013	0,019	0,084	0,057	0,065
30	11,06	0,070	0,060	0,066	0,109	0,090	0,104	0,052	-0,024	0,029	0,008	0,020	0,019	0,053	-0,016	0,030
40	17,63	0,050	0,045	0,055	0,091	0,081	0,106	0,029	0,011	-0,005	0,011	0,014	0,024	0,030	0,016	0,007
50	23,87	0,064	0,082	0,111	0,104	0,138	0,186	-0,006	-0,048	0,027	0,023	0,031	0,030	0,004	0,006	0,031
60	29,48	0,134	0,149	0,228	0,177	0,218	0,440	0,092	0,058	0,107	0,017	0,033	0,061	0,093	0,082	0,127
70	38,07	0,287	0,334	0,422	0,315	0,396	0,523	0,235	0,270	0,343	0,016	0,029	0,037	0,244	0,272	0,357
80	42,14	0,462	0,565	0,604	0,512	0,616	0,660	0,424	0,508	0,571	0,016	0,019	0,016	0,428	0,525	0,572
90	42,41	0,532	0,624	0,626	0,601	0,686	0,653	0,494	0,527	0,594	0,023	0,021	0,012	0,496	0,570	0,598
Pressões no teto para velocidade de abertura 2,7 mm/s																
Abertura (%)	Vazão (l/s)	Pressão média (mca)			Pressão máxima (mca)			Pressão mínima (mca)			Flutuação de pressão (mca)			P _{1%} (mca)		
		T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7
10	1,73	0,161	0,160	0,152	0,186	0,200	0,192	0,145	0,137	0,114	0,009	0,013	0,017	0,147	0,138	0,116
20	4,59	0,110	0,103	0,110	0,134	0,132	0,157	0,092	0,046	0,067	0,009	0,018	0,019	0,094	0,059	0,073
30	9,34	0,046	0,046	0,046	0,069	0,076	0,082	0,031	-0,009	0,007	0,008	0,014	0,017	0,032	0,023	0,008
40	13,96	0,039	0,038	0,030	0,067	0,068	0,071	0,005	0,012	-0,008	0,013	0,013	0,020	0,008	0,014	-0,007
50	19,73	0,024	0,020	0,059	0,068	0,074	0,140	-0,007	-0,069	-0,048	0,016	0,027	0,040	-0,006	-0,057	-0,041
60	24,88	0,068	0,070	0,109	0,103	0,132	0,201	0,029	0,010	0,011	0,020	0,026	0,047	0,030	0,018	0,012
70	30,83	0,159	0,213	0,299	0,206	0,279	0,377	0,106	0,117	0,223	0,018	0,029	0,033	0,111	0,137	0,234
80	39,29	0,302	0,450	0,496	0,353	0,569	0,574	0,248	0,354	0,435	0,021	0,035	0,028	0,263	0,366	0,447
90	44,56	0,534	0,590	0,588	0,581	0,624	0,609	0,476	0,549	0,554	0,023	0,016	0,011	0,481	0,551	0,555
Pressões no teto para velocidade de abertura 3,6 mm/s																
Abertura (%)	Vazão (l/s)	Pressão média (mca)			Pressão máxima (mca)			Pressão mínima (mca)			Flutuação de pressão (mca)			P _{1%} (mca)		
		T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7	T5	T6	T7
10	1,45	0,159	0,154	0,147	0,210	0,197	0,196	0,116	0,137	0,120	0,014	0,013	0,015	0,128	0,137	0,121
20	3,77	0,078	0,079	0,075	0,093	0,094	0,106	0,060	0,049	0,041	0,007	0,010	0,015	0,061	0,053	0,044
30	7,63	0,051	0,051	0,048	0,089	0,105	0,093	0,029	0,013	-0,016	0,014	0,019	0,024	0,031	0,020	-0,007
40	11,42	0,016	0,012	0,031	0,079	0,051	0,095	-0,023	-0,026	-0,038	0,017	0,018	0,028	-0,022	-0,025	-0,030
50	16,76	0,006	0,021	0,051	0,047	0,084	0,141	-0,027	-0,060	-0,016	0,015	0,030	0,044	-0,027	-0,041	-0,014
60	21,35	0,040	0,057	0,092	0,068	0,126	0,195	-0,008	-0,004	0,004	0,013	0,029	0,045	0,002	0,000	0,007
70	27,28	0,121	0,153	0,239	0,162	0,248	0,309	0,069	-0,125	0,102	0,022	0,052	0,047	0,078	0,004	0,134
80	40,62	0,289	0,442	0,488	0,330	0,484	0,533	0,235	0,396	0,441	0,020	0,020	0,021	0,247	0,402	0,443
90	40,45	0,455	0,516	0,513	0,577	0,552	0,540	0,350	0,399	0,471	0,030	0,021	0,014	0,407	0,471	0,477

Tabela 10. Vazões e velocidades do escoamento para o teto e base do conduto em regime transitório com parada

Teto e Base do conduto																		
Abertura	Velocidade de Abertura 1,8 mm/s						Velocidade de Abertura 2,7 mm/s						Velocidade de Abertura 3,6 mm/s					
	Vazão (l/s)			Velocidade na “vena contracta” (m/s)			Vazão (l/s)			Velocidade na “vena contracta” (m/s)			Vazão (l/s)			Velocidade na “vena contracta” (m/s)		
(%)	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
10	2,252	2,437	2,089	1,099	1,190	1,020	1,736	1,955	1,491	0,848	0,955	0,728	1,379	1,665	1,247	0,673	0,813	0,609
20	6,070	6,103	6,033	1,602	1,611	1,592	4,598	4,798	4,177	1,214	1,266	1,102	5,146	5,743	4,931	1,358	1,516	1,302
30	11,104	11,295	10,628	2,066	2,101	1,977	9,321	10,031	8,772	1,734	1,866	1,632	7,642	7,739	7,559	1,422	1,440	1,406
40	17,473	18,054	17,323	2,438	2,519	2,417	13,493	13,691	12,763	1,882	1,910	1,781	11,610	12,299	11,179	1,620	1,716	1,560
50	23,658	24,011	23,286	2,603	2,642	2,562	20,000	20,316	19,243	2,201	2,235	2,117	16,767	16,847	16,719	1,845	1,854	1,840
60	29,106	29,784	28,966	2,461	2,518	2,449	24,677	25,572	24,458	2,086	2,162	2,068	21,091	21,871	20,519	1,783	1,849	1,735
70	38,082	38,451	37,940	2,592	2,617	2,582	30,833	30,892	30,770	2,098	2,102	2,094	27,409	27,997	26,622	1,865	1,905	1,812
80	42,146	42,192	42,111	2,287	2,289	2,285	39,296	39,744	38,979	2,132	2,156	2,115	40,628	41,021	40,220	2,204	2,226	2,182
90	42,414	42,657	42,326	-	-	-	44,561	44,867	44,217	-	-	-	40,492	41,090	40,121	-	-	-

