

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Mariane Kempka**

**DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES A JUSANTE DE  
COMPORTAS TIPO SEGMENTO INVERTIDA: APLICAÇÃO  
EM ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO**

Porto Alegre  
novembro 2011

**MARIANE KEMPKA**

**DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES A JUSANTE DE  
COMPORTAS TIPO SEGMENTO INVERTIDA: APLICAÇÃO  
EM ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Marcelo Giulian Marques**  
**Coorientador: Alexandre Augusto Mees**

Porto Alegre  
novembro 2011

**MARIANE KEMPKA**

**DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES A JUSANTE DE  
COMPORTAS TIPO SEGMENTO INVERTIDA: APLICAÇÃO  
EM ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO**

Porto Alegre, novembro de 2011

Prof. Marcelo Giulian Marques  
PhD pelo Département de Génie Civil,  
Université Laval/ Québec  
Orientador

Eng. Alexandre Augusto Mees  
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental, UFRGS/ Porto Alegre  
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Mauricio Dai Prá (UFPEL)**  
Dr. pela UFRGS

**Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres (UFRGS)**  
Dr. pela UFRGS

**Eng. Alexandre Augusto Mees**  
Me. pela UFRGS

**Prof. Marcelo G. Marques (UFRGS)**  
PhD pela Université Laval, Canadá

Dedico este trabalho a meus pais, Lidio Kempka e Silvia Kempka e a minha madrinha Carla Viviane Wottrich que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Marcelo Marques, pela dedicação posta com o fim de direcionar e orientar o presente trabalho.

Agradeço ao engenheiro Alexandre Mees pela sua incansável disposição em coorientar a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço aos meus pais, que não mediram esforços para que eu chegasse e cumprisse com êxito esta etapa da minha vida.

Agradeço ao meu noivo Rodrigo Scapinello pelo apoio concedido em todos os momentos difíceis que se apresentaram ao longo da graduação.

Agradeço, também, a minha madrinha Carla Viviane Wottrich, a qual foi fundamental nessa caminhada.

Por fim, agradeço a Deus, por ter me privilegiado com a presença de todas as pessoas citadas, sem as quais não poderia ter chegado até este momento.

Se tens que lidar com água, consulta primeiro a  
experiência, depois a razão.

*Leonardo da Vinci*

## RESUMO

O uso de comportas ou válvulas em condutos para efetuar o controle de fluxo em estruturas hidráulicas é bastante usual. Entretanto, a sua aplicação deve ser feita com cuidado em função da possibilidade de ocorrência de grandes diferenciais de pressão entre as faces de montante e jusante das comportas, já que essas podem gerar escoamentos altamente turbulentos e de grande complexidade. O escoamento, neste caso, pode vir a ter velocidades elevadas que podem ocasionar uma grande depressão e, conseqüentemente, cavitação, se a pressão no líquido atingir a pressão de vapor. Para fazer o enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação é necessário o uso desses dispositivos de controle de vazões. Junto a estes podem ocorrer problemas de cavitação. Assim, torna-se interessante obter critérios de previsão do valor destas pressões para, então, poder inferir a possibilidade de cavitação, ou não, para uma dada condição de operação, esvaziamento ou enchimento da câmara, da eclusa. Este trabalho procura apresentar o estado da arte em relação à distribuição das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida visando compreender o comportamento das mesmas e com isto determinar os graus de danos à estrutura. Inicialmente, é feita uma pesquisa bibliográfica na qual são apresentadas as eclusas de navegação, seu funcionamento e a conceituação de cavitação. Para a coleta de dados, são realizados ensaios em laboratório, num modelo reduzido que permite a caracterização de todos os parâmetros envolvidos, por fim são, então, apresentados os resultados. Tais resultados mostram que as pressões mais preocupantes do ponto de vista do desgaste do concreto são oriundas das maiores vazões passantes com a menor porcentagem de abertura da comporta.

Palavras-chave: Eclusas. Cavitação. Comporta Segmento Invertida. Pressões Mínimas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eclusa de Tucuruí.....	15
Figura 2 – Funcionamento esquemático de uma eclusa.....	16
Figura 3 – Esquema das etapas a serem desenvolvidas no trabalho.....	21
Figura 4 – Barcos estacionados no interior da câmara da eclusa de Barra Bonita.....	22
Figura 5 – Esquema de uma comporta segmento utilizada num descarregador de superfície.....	25
Figura 6 – Comporta tipo segmento, utilizada na posição invertida – os braços radiais funcionam sob regime de tração.....	26
Figura 7 – Distribuição de pressões médias, no teto do conduto, a jusante da comporta, para vazão passante de 220 l/s e abertura de 60%.....	27
Figura 8 – Critério de cavitação para comporta vagão.....	32
Figura 9 – Coeficientes de contração na comporta segmento invertida.....	33
Figura 10 – <i>Vena contracta</i> : região de maior velocidade e menores pressões.....	33
Figura 11 – Esquema do modelo utilizado para obtenção dos dados.....	36
Figura 12 – Esquema com as principais variáveis mensuráveis.....	37
Figura 13 – Fluxo através da comporta.....	37
Figura 14 – Medição de pressões médias por meio de piezômetros.....	38
Figura 15 – Transdutores de pressão, a jusante da comporta, utilizados para medir as pressões instantâneas.....	39
Figura 16 – Modelo utilizado para aquisição de dados.....	39
Figura 17 – Posição dos equipamentos de medição de pressão ao longo do conduto.....	41
Figura 18 – Comportamento das pressões na base com a comporta operando com 10% de abertura.....	43
Figura 19 – Comportamento das pressões com na base com a comporta operando com 30% de abertura.....	43
Figura 20 – Comportamento das pressões com na base com a comporta operando com 100 % de abertura.....	44
Figura 21 – Comportamento das pressões na base para uma mesma vazão, 32 l/s, e porcentagens de aberturas diferentes.....	44
Figura 22 – Comportamento das pressões no teto com a comporta operando com 10% de abertura.....	45
Figura 23 – Comportamento das pressões no teto com a comporta operando com 30% de abertura.....	46
Figura 24 – Comportamento das pressões no teto com a comporta operando com 100% de abertura.....	46

Figura 25 – Comportamento das pressões no teto para uma mesma vazão, 32 l/s, e porcentagens de aberturas diferentes.....	47
Figura 26 – Comparativo entre as pressões registradas na base e no teto do conduto para vazão passante de 32 l/s.....	47
Figura 27 – Comportamento das pressões $P_{1\%}$ na base com a comporta operando com 10% de abertura.....	49
Figura 28 – Comportamento das pressões $P_{1\%}$ na base, com a comporta operando com 30% de abertura.....	49
Figura 29 – Comportamento das pressões, $P_{1\%}$ na base, com a comporta operando com 100% de abertura.....	50
Figura 30 – Comportamento das pressões $P_{1\%}$ no teto, com a comporta operando com 10% de abertura.....	50
Figura 31 – Comportamento das pressões $P_{1\%}$ no teto, com a comporta operando com 30% de abertura.....	51
Figura 32 – Comportamento das pressões $P_{1\%}$ no teto, com a comporta operando com 100% de abertura.....	51
Figura 33 – Comportamento das pressões $P_{1\%}$ para a vazão de 32 l/s com diferentes aberturas.....	52
Figura 34 – Comportamento das pressões $P_{0,1\%}$ na base, com a comporta operando com 10% de abertura	53
Figura 35 – Comportamento das pressões mínimas $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 30% de abertura.....	53
Figura 36 – Comportamento das pressões $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 100% de abertura.....	54
Figura 37 – Comportamento das pressões $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 10% de abertura.....	55
Figura 38 – Comportamento das pressões $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 30% de abertura.....	55
Figura 39 – Comportamento das pressões $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 100% de abertura.....	56
Figura 40 – Comportamento das pressões para vazão de 32 l/s.....	56
Figura 41 – $\sigma_{mod}$ para pressões médias na base.....	58
Figura 42 – $\sigma_{mod}$ para pressões 1% na base.....	59
Figura 43 – $\sigma_{mod}$ para pressões 0,1% na base.....	59
Figura 44 – Detalhe dos valores negativos de $\sigma_{mod}$ em função do parâmetro $A_M$ para a base do conduto.....	60
Figura 45 – $\sigma_{mod}$ para pressões médias no teto.....	61
Figura 46 – $\sigma_{mod}$ para pressões 1% no teto.....	61
Figura 47 – $\sigma_{mod}$ para pressões 0,1% no teto.....	62

Figura 48 – Detalhe dos valores negativos de $\sigma_{\text{mod}}$ em função do parâmetro $A_M$ para o teto do conduto.....	63
Figura 49 – Comportamento das pressões em função da vazão.....	64
Figura 50 – Curvas para os diferentes níveis de danos que a base do conduto está sujeita.....	66
Figura 51 – Curvas para os diferentes níveis de danos que o teto do conduto está sujeito.....	66
Figura 52 – Envoltórias.....	67
Figura 53 – Envoltórias finais para os níveis de danos.....	67
Figura 54 – Comparação dos valores de $\sigma$ , para comportas tipo segmento invertida, com valores de $\sigma$ para comportas tipo vagão.....	68

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Eclusas de alta queda brasileiras.....	24
Quadro 2 – Características dos transdutores de pressão.....	38
Quadro 3 – Resumo dos ensaios.....	40
Quadro 4 – Índice de cavitação considerando pressão igual a -6 mca (-0,375 mca em modelo) para os diferentes probabilidades de ocorrência.....	65
Quadro 5 – Valores de $\sigma$ (índice de cavitação) para que se dê início aos danos	69

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – menor área (efetiva) do escoamento a jusante da comporta (veia contraída)

$A_M$  – parâmetro adimensional

$a$  – abertura da comporta (m)

$c$  – celeridade (m/s)

$C_c$  – coeficiente de contração

$D$  – altura do conduto (m)

$E$  – módulo de elasticidade (N.m<sup>2</sup>)

$e$  – espessura do conduto (m)

$K$  – parâmetro de cavitação

$K_2$  – módulo de elasticidade da água (N/m<sup>2</sup>)

$l$  – largura do aqueduto (m)

$P$  – pressão (mca)

$P_{1\%}$  - pressão com probabilidade de 1% de ser menor que certo valor (mca)

$P_{0,1\%}$  - pressão com probabilidade de 0,1% de ser menor que certo valor (mca)

$P_{atm}$  – pressão atmosférica (mca)

$P_V$  – pressão a jusante (mca)

$P_{VG}$  – pressão relativa de vapor (mca)

$P_U$  – pressão de montante da válvula (mca)

$Q$  – vazão (m<sup>3</sup>/s)

$V$  – velocidade do escoamento (m/s)

$X$  – distância da comporta (m)

$\sigma$  – índice de cavitação

$\sigma_{\text{mod}}$  – índice de cavitação modificado

$\Delta P$  – diferença de pressão (mca)

$\rho$  – massa específica do líquido ( $\text{Kg/m}^3$ )

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....</b>	<b>19</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	19
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	19
<b>2.2.1 Objetivo Principal.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 Objetivos Secundários.....</b>	<b>19</b>
2.3 PRESSUPOSTO.....	20
2.4 PREMISA.....	20
2.5 DELIMITAÇÕES.....	20
2.6 LIMITAÇÕES.....	20
2.7 DELINEAMENTO.....	20
<b>3 ECLUSAS.....</b>	<b>22</b>
3.1 ECLUSAS DE ALTA QUEDA.....	23
3.2 COMPORTAS SEGMENTO EM ECLUSAS.....	25
<b>4 CAVITAÇÃO.....</b>	<b>27</b>
4.1 POTENCIAL DE CAVITAÇÃO.....	30
4.2 MEDIDAS MITIGADORAS DE CAVITAÇÃO.....	34
<b>4.2.1 Encamisamento com material resistente à cavitação.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.2 Aeração.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.3 Mudança na geometria do conduto.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.4 Leis de manobra especiais para a abertura da comporta.....</b>	<b>35</b>
<b>5 METODOLOGIA DE PESQUISA.....</b>	<b>36</b>
<b>6 ANÁLISE DE DADOS.....</b>	<b>42</b>
6.1 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES MÉDIAS.....	42
<b>6.1.1 Comportamento das pressões médias na base do conduto.....</b>	<b>42</b>
<b>6.1.2 Comportamento das pressões médias no teto do conduto.....</b>	<b>45</b>
6.2 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES MÍNIMAS COM PROBABILIDADE DE 1% ( $P_{1\%}$ ).....	48
<b>6.2.1 Comportamento das pressões mínimas (<math>P_{1\%}</math>) na base do conduto.....</b>	<b>48</b>
<b>6.2.2 Comportamento das pressões mínimas (<math>P_{1\%}</math>) no teto do conduto.....</b>	<b>50</b>
6.3 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES MÍNIMAS EXTREMAS ( $P_{0,1\%}$ ).....	52
<b>6.3.1 Comportamento das pressões mínimas extremas (<math>P_{0,1\%}</math>) na base do conduto..</b>	<b>52</b>
<b>6.3.2 Comportamento das pressões mínimas extremas (<math>P_{0,1\%}</math>) no teto do conduto..</b>	<b>54</b>

6.4 ESTIMATIVA DAS PRESSÕES MÍNIMAS A JUSANTE DA COMPORTA.....	57
<b>6.4.1 Parâmetros adimensionais para o caso da base do conduto.....</b>	<b>58</b>
<b>6.4.2 Parâmetros adimensionais para o caso do teto do conduto.....</b>	<b>60</b>
6.5 ESTIMATIVA DE DANOS À ESTRUTURA EM FUNÇÃO DA OCORRÊNCIA DE PRESSÕES MÍNIMAS.....	63
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
REFERÊNCIAS .....	71
APÊNDICE A.....	73



## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta uma densa rede hidrográfica com rios extensos, largos e profundos. Esses rios se apresentam principalmente nas regiões Sul e Sudeste, em vales encaixados, com grandes desníveis. Esses desníveis são determinantes no processo de geração de energia hídrica, porém a navegabilidade dos rios fica comprometida. Deste modo é necessário que se encontre um equilíbrio entre estes dois setores, o de transporte e o energético. Sabe-se que o desenvolvimento e a inclusão social se dão mediante a disponibilidade tanto de energia quanto de transporte rápido, fácil e seguro. Isso proporciona, aos centros consumidores, produtos com preços mais competitivos, uma vez que o preço do transporte também encarece a mercadoria final. Dentro deste cenário, a construção de eclusas, que permitam a transposição destes desníveis, vem auxiliar o desenvolvimento socioeconômico do país.

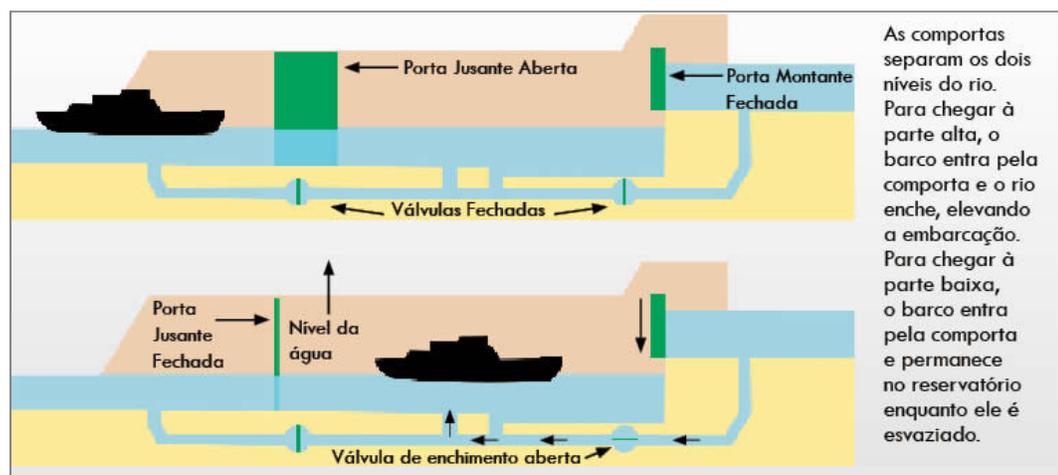
Para que a construção de barragens e a navegabilidade dos rios sejam viáveis, usam-se estruturas denominadas eclusas. Essas estruturas de navegação são mecanismos que têm a função de promover, de forma segura, a transposição dos desníveis. A figura 1 apresenta a eclusa da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no Rio Tocantins e, a figura 2, mostra o mecanismo de funcionamento de uma eclusa.

Figura 1 – Eclusa de Tucuruí



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

Figura 2 – Funcionamento esquemático de uma eclusa



(fonte: BRAZ, 2010)

Sabe-se que (trabalho não publicado)<sup>1</sup>:

As eclusas, principalmente as de alta queda, são estruturas que desafiam a criatividade humana, pois são acompanhadas de diversos fenômenos hidráulicos nocivos que devem ser estudados, de forma a identificar suas características, os problemas associados e as soluções possíveis para evitar que ocorram danos às obras hidráulicas.

Dentre as maiores dificuldades no projeto e na operação dessas obras hidráulicas estão:

- a) agitação da superfície da linha d'água no interior da câmara;
- b) quantificação dos esforços nas amarras;
- c) as altas quedas necessárias, que proporcionam altas velocidades no interior dos condutos e, conseqüentemente, a diminuição das pressões, favorecendo o fenômeno de cavitação.

Os esforços nas amarras estão ligados diretamente as agitações da linha d'água no interior da câmara. A vazão aduzida para a câmara não é constante ao longo do tempo e, por conta disso, formam-se oscilações harmônicas em seu interior, podendo estas ser uninodais ou multinodais. Independentemente de sua natureza, as oscilações podem atingir grandes amplitudes e a consequência disso são os esforços em demasia nas amarras e na estrutura dos barcos. Quando essas tensões ultrapassam os limites de tensão admitidos, ocorre o

<sup>1</sup> Foi consultado o Projeto de Tese de Doutorado de Cristiane Collet Battiston, para o exame de qualificação, intitulado de Estudo do Escoamento a Jusante de Válvulas de Eclusa, visando à supressão de cavitação sem adição de ar. O doutoramento está sendo realizado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2008.

rompimento dos cabos, como consequência os barcos ficam livres, podendo se chocar com as paredes da eclusa e com os demais barcos que podem estar sendo transportados, danificando o sistema elevatório e os próprios barcos.

Já a cavitação é o fenômeno que consiste na formação de bolhas em locais onde as pressões atingem a pressão de vapor. Quando as bolhas são levadas pelo escoamento para regiões onde a pressão é maior que a pressão de vapor, essas bolhas tendem a implodir causando uma onda de sobrepressão que pode ocasionar destruição das paredes dos aquedutos, além de vibrações e ruídos em decorrência das flutuações de pressões. Essa implosão, ao ocorrer junto à parede do conduto, pode ocasionar erosão da superfície.

Em eclusas, os locais mais propícios à cavitação são as curvas dos condutos e a região da comporta controladora de vazão. No primeiro caso, a força centrífuga direciona o escoamento para o lado exterior do conduto, gerando uma zona de depressão na parte mais interna, e essa depressão possibilita a formação das bolhas. No segundo, as altas velocidades, abaixo da região da comporta, atingem valores de pressão iguais ou menores que a pressão de vapor da água, dessa forma esta representa a região mais delicada no que diz respeito às pressões mínimas.

Este trabalho é justificado pela importância do assunto e devido ao cenário nacional, que é composto por uma vasta quilometragem de rios, grande potencial hidrelétrico e necessidade de expansão do transporte hidroviário. Ainda em favor a este, existe o Projeto de Lei 209/2007<sup>2</sup>, que torna obrigatória a construção de eclusas de navegação junto às barragens.

O trabalho contém 7 capítulos destinados a esclarecimentos acerca do assunto abordado. O capítulo 1, este que se apresenta, foi dedicado à elucidação acerca das hidrovias brasileiras, papel das eclusas no sistema hidroviário e, ainda, fazer uma breve explicação sobre o funcionamento das eclusas de navegação. Já o capítulo 2 é responsável por apresentar, de forma concisa, a relevância do assunto, os objetivos, limitações e delimitações que regeram a execução deste trabalho de conclusão de curso. No capítulo 3 inicia-se a pesquisa bibliográfica propriamente dita, sendo as eclusas e seus constituintes apresentados e

---

<sup>2</sup> O senador Eliseu Resende é autor do Projeto de Lei 209/2007, que determina a construção de eclusas em todas as obras de usinas hidrelétricas. O objetivo de Resende é evitar futuros prejuízos para a matriz nacional de transporte e para a política desenvolvida pelo Plano Nacional de Logística de Transportes. O Projeto, entretanto, está com tramitação parada desde junho de 2009.

caracterizados. No capítulo 4, faz-se uma abordagem sobre o fenômeno de cavitação, causas e consequências e medidas que possam amenizar os efeitos ocasionados pelo fenômeno. No capítulo 5 aborda-se a metodologia de pesquisa, os equipamentos utilizados, ou seja, o programa experimental é caracterizado. Posteriormente, no capítulo de número 6, são feitas as análises de dados e a divulgação dos resultados e, para finalizar o trabalho, no capítulo de número 7 são apresentadas as conclusões que a pesquisa proporcionou.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes que orientam este trabalho estão apresentadas neste capítulo.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: como o comportamento das pressões, observado em modelo reduzido, pode indicar a possibilidade de ocorrência de danos, em função do tempo de duração das pressões mínimas, a jusante de comportas tipo segmento invertida de eclusas de navegação?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e serão apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a identificação das regiões onde ocorrem pressões negativas, visando inferir a possibilidade de ocorrência de danos à estrutura e de cavitação.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) análise do comportamento das pressões;
- b) definição de critérios para previsão das pressões mínimas que podem ocorrer em função das condições de contorno do escoamento.

## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que é possível verificar pressões que ocorrem à jusante de uma comporta segmento invertida a partir do modelo reduzido.

## 2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que há preocupação dos projetistas e dos operadores de eclusagem em conhecer a distribuição das pressões a jusante de comportas segmento invertida para as diferentes condições de contorno visando minimizar os problemas de erosão do concreto a jusante das válvulas controladoras de vazão.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de eclusas com comportas do tipo segmento invertida em experimentos de laboratório realizados no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

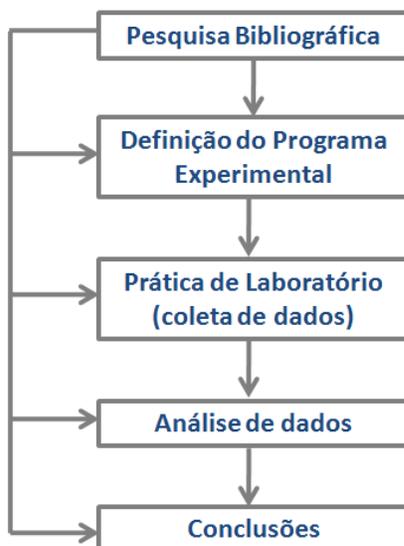
- a) a vazão máxima de ensaio e, conseqüentemente, as faixas em que se encontram os números, adimensionais, de Froude e Reynolds;
- b) os ensaios são realizados apenas na condição de enchimento da câmara;
- d) a simulação ocorre somente sob regime permanente;
- e) a escala do modelo utilizada é 1:16.

## 2.7 DELINEAMENTO

Os ensaios para obtenção dos dados foram realizados em modelo reduzido, na escala 1:16, através dos quais foi possível medir as pressões originadas com a passagem do escoamento por um estrangulamento ocasionado por uma comporta tipo segmento. O trabalho foi desenvolvido em cinco etapas, as quais estão apresentadas na figura 3;

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição do programa experimental;
- c) prática de laboratório (coleta de dados);
- d) análise de dados;
- e) conclusões.

Figura 3 – Esquema das etapas desenvolvidas no trabalho



(fonte: elaborada pela autora)

As etapas são descritas nos próximos parágrafos.

A pesquisa bibliográfica proporcionou a arrecadação de material necessário para o embasamento teórico dos temas relacionados ao trabalho, tais como definição de eclusa e todos os componentes nela inseridos, além de informações sobre o fenômeno.

A definição do programa experimental consistiu na elaboração do plano de ensaios, bem como a determinação das vazões ensaiadas, aberturas de comporta e calibração dos transdutores de pressão. Na sequência, deu-se início à investigação experimental ou prática de laboratório. Após a investigação experimental, que permitiu obtenção dos dados de pressão, iniciaram-se as análises de dados e para término do trabalho, a última etapa, as conclusões. A descrição do programa experimental está detalhada no capítulo 5.

### 3 ECLUSAS

As eclusas de navegação são mecanismos semelhantes a elevadores. Elas têm a função de transpor embarcações através de desníveis, naturais ou de ação antrópica, como as barragens, permitindo assim a navegação. A figura 4 mostra barcos sendo transpostos pela eclusa de Barra Bonita no estado de São Paulo. Ussami (1980) destaca que as eclusas são estruturas hidráulicas, cuja finalidade é transpor de nível as embarcações por meio de enchimento ou esvaziamento da câmara, onde são estacionadas as embarcações. Sabe-se que a câmara, juntamente com todo o sistema de eclusagem, funciona segundo o princípio de vasos comunicantes.

Figura 4 – Barcos estacionados no interior da câmara da eclusa de Barra Bonita



(fonte: ESTÂNCIA TURÍSTICA DE BARRA BONITA, 2011)

As eclusas possuem as seguintes componentes (USSAMI, 1980, p. 8-9):

A câmara da eclusa é, geralmente, de forma retangular, constituída de dois muros verticais paralelos, fechada nas extremidades por soleiras e portas onde entram e saem as embarcações. As extremidades da câmara, onde são instaladas as portas, são denominadas cabeças da eclusa. Existem, portanto, duas cabeças: uma, a montante, e outra, a jusante da câmara da eclusa.

A partir dessas cabeças das eclusas são construídos muros relativamente longos, que se estendem nas direções dos canais de aproximação, tanto a montante como a jusante, com a finalidade de direcionar as embarcações em trânsito. Esses muros são denominados de muros-guia.

As portas são de grandes proporções, devendo ser suficientes para permitir a passagem das embarcações. São geralmente construídas de aço, seguindo um grande número de variações e tipos. São normalmente instaladas aos pares, uma na cabeça de montante e outra na de jusante. Contudo, em alguns casos, são instaladas três ou mais comportas por razões de economia de água ou para a diminuição de riscos de mal funcionamento das mesmas.

As operações de enchimento e esvaziamento das eclusas são realizadas por sistemas apropriados, denominados de sistemas de adução e esgotamento. Os sistemas são constituídos de aquedutos primários e secundários, derivações, orifícios, comportas, difusores, tomada d'água, dispositivos especiais, etc., cuja finalidade é alimentar e esgotar convenientemente a câmara, sem causar danos às embarcações, evitando colocar em risco os seus tripulantes, ao mesmo tempo sem causar excessiva demora na transposição do desnível.

*United States of America* (1995) classifica as eclusas em baixa queda, nas quais os desníveis atingem até 10 m, eclusas de média queda, entre 10 e 15 m, e as eclusas de alta queda, desníveis acima de 15 m. De acordo com Santos (1998), as eclusas de baixa queda são utilizadas para melhoria de navegação, já as de alta queda são utilizadas para fins específicos, em rios com declives mais acentuados. No Brasil, outra situação comum é o de eclusas projetadas em usinas nas quais prevaleceu o interesse hidrelétrico. O mesmo autor ainda salienta que a queda hidráulica de uma eclusa é a diferença entre os níveis de água de montante e jusante. São essas quedas que definem o tipo, a classificação e o custo de projeto, execução, operação e manutenção. Na sequência serão abordados os detalhes de eclusas de alta queda e as características das comportas tipo segmento invertida.

### 3.1 ECLUSAS DE ALTA QUEDA

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

Quadro 1 – Eclusas de alta queda brasileiras

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

(fonte: adaptada de SANTOS, 1998)

As eclusas de alta queda estão associadas a intenções múltiplas, em geral, à geração de energia elétrica, nas quais quanto maior a queda, maior o potencial. Os altos desníveis, acima de 15 m (UNITED STATES OF AMERICA, 1995), vêm sendo bastante utilizados no Brasil devido a grande utilização de barramentos, que formam os reservatórios das hidrelétricas. Porém, o uso desses sistemas de alta queda possui diversas limitações, as quais se destacam (SANTOS, 1998, p. 17-19):

- a) volume das eclusagens, que em hidrovias de rios com vazões pequenas podem ser importante [...];
- b) o pico das vazões de enchimento/esvaziamento, que são altos, implicando cuidados especiais em todo projeto [...];
- c) problemas de cavitação a jusante das válvulas, comuns na alta queda e extremamente preocupantes, a medida que podem danificar o conduto a jusante das válvulas, provocando interrupções para manutenção;
- d) problemas com a tranquilidade do plano da água interno à câmara e consequente minimização de esforços nas embarcações; a alta queda implica alta energia cinética no nível de distribuição interna, no início do enchimento, o que leva a problemas de turbulência local; a alta queda também maximiza desequilíbrios na distribuição de velocidades nos condutos, o que se traduz por diversidade de vazões aduzidas em partes diversas da câmara, implicando em formação de ondas estacionárias, ou estacionárias/evolutivas, com graves consequências nos esforços em cabos de amarras das embarcações, em particular dos comboios, eventualmente resultando em enorme grau de insegurança.

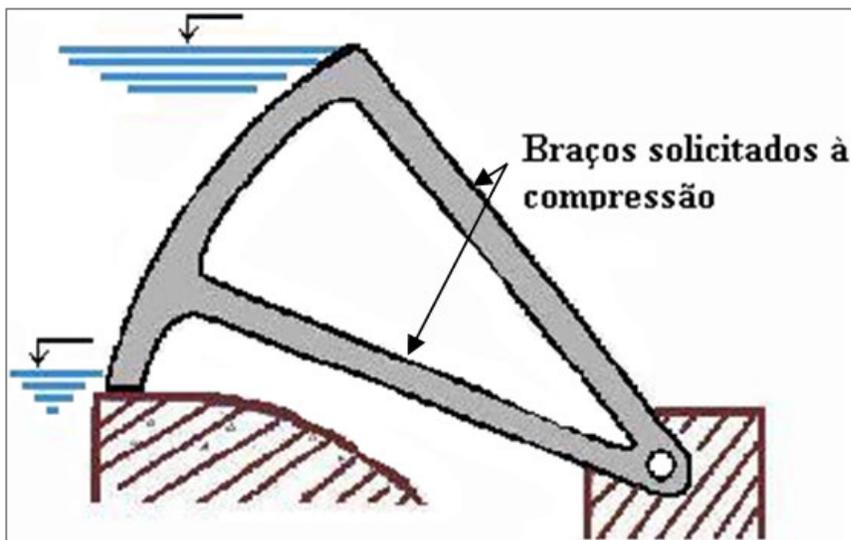
Dentre as limitações citadas, a de maior importância para o trabalho que discorre é a ocorrência de cavitação. Como medida para diminuir os efeitos deste fenômeno, que será discutido posteriormente, encontra-se o uso de comportas tipo segmento invertida.

### 3.2 COMPORTAS SEGMENTO EM ECLUSAS

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

Santos (1998) afirma que vários tipos de válvulas foram utilizadas em eclusas, sendo que até 1950, nas eclusas de alta queda, predominava a aplicação de comportas planas. A partir de 1930, devido ao grande sucesso técnico e econômico que estava sendo obtido com a aplicação de comportas segmento (*Tainter gates*) em descarregadores de superfície, figura 5, essas comportas passaram a ser aplicadas nos sistemas de enchimento/esvaziamento das eclusas.

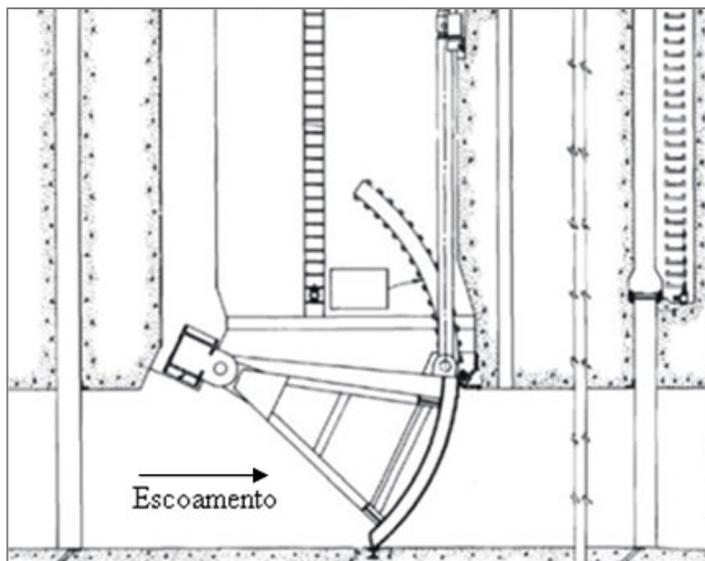
Figura 5 – Esquema de uma comporta segmento utilizada num descarregador de superfície



(fonte: adaptada de TIPOS..., 2011)

A comporta segmento é formada, geralmente, por uma chapa metálica curva, segmento de um cilindro. Quando utilizada em descarregadores de superfície, os braços radiais da comporta funcionam à compressão. Quando utilizada invertida, caso das eclusas, figura 6, os braços funcionam à tração. Além disto, o escoamento na parte de montante, na qual estão os braços, é mais tranquilo, e os braços não atrapalham o escoamento.

Figura 6 – Comporta tipo segmento, utilizada na posição invertida – os braços radiais funcionam sob regime de tração



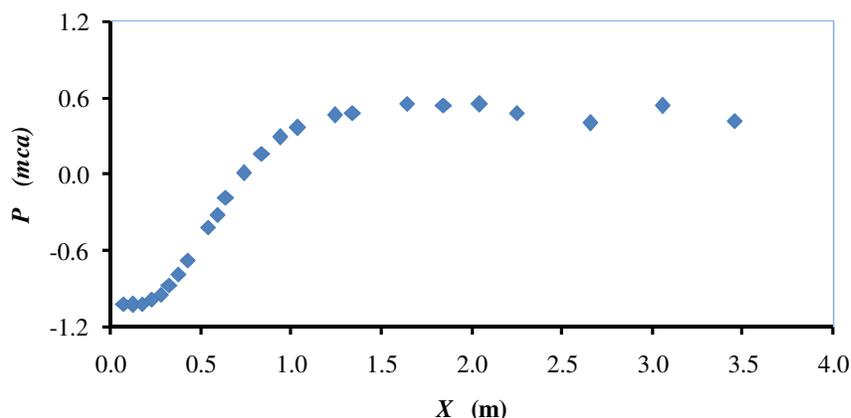
(fonte: adaptada de UNITED STATES OF AMERICA, 1975)

Santos (1998) explica que o uso da comporta segmento favorece a entrada de ar nos aquedutos pelo poço da comporta, na fase acelerada do escoamento, a jusante da comporta. Essa entrada de ar pode limitar a vazão líquida. A entrada de ar causa, então, grande turbulência e perturbações no plano de água interno à câmara, quando o ar for expulso, causando riscos à segurança das embarcações. A comporta segmento passou, então, a ser implantada na posição invertida, com braços solicitados à tração. Quando a comporta é utilizada desta forma, a região de baixa pressão não fica abaixo do poço da comporta, dessa forma o ar da superfície não é levado para o escoamento. Atualmente, não se concebe outra solução que possa ter melhor desempenho técnico-econômico para as eclusas de alta queda do que a comporta segmento invertida.

## 4 CAVITAÇÃO

Santos (1998) caracteriza o desenvolvimento das pressões, nos circuitos de alta queda, pela variação brusca ocasionada pela presença das válvulas. É própria do processo de enchimento ou de esvaziamento a queda brusca de pressão. A figura 7 mostra o comportamento das pressões associado às altas velocidades, o que, aliás, pode, em certas circunstâncias (se ocorrerem pressões negativas), resultar em um forte potencial de cavitação.

Figura 7 – Distribuição de pressões médias, no teto do conduto, a jusante da comporta, para vazão passante de 220 l/s e abertura de 60%



(fonte: BATTISTON et al., 2009)

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

O processo de formação das bolhas pode ser originado de dois modos (TERRES, 2006, p. 5):

[...] por aquecimento do fluido, mantendo-se sua pressão constante ou por diminuição de sua pressão, mantendo-se a temperatura constante. No primeiro caso, ocorre apenas a transição da fase líquida para a fase vapor, mas quando a mudança de fase ocorre pela queda da pressão, então o fenômeno é denominado de cavitação.

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

A cavitação pode ser diferenciada em dois tipos, gasosa e vaporosa (TULLIS, 1982, p. 1.2):

A cavitação gasosa ocorre quando, ou existe uma considerável quantidade de ar em suspensão na água ou quando o processo de cavitação é suficientemente lento, permitindo o aumento da quantidade de ar no interior da cavidade de vapor em decorrência da desgaseificação do líquido. A taxa de crescimento e colapso da bolha é muito mais lenta para a cavitação gasosa devido a presença de ar livre. Consequentemente, o processo não é tão violento e normalmente não deverá criar uma situação de algum interesse.

Terres (2006) explica que a presença da fase gasosa no escoamento implica em uma maior resistência ao escoamento, causando uma diminuição da vazão, considerável perda de carga e pulsações de pressão indesejáveis no escoamento, no entanto, de acordo com Tullis (1982, p. 1.2) é para a cavitação vaporosa que se deve ter mais atenção:

Se existir pouquíssimo ar no líquido, de forma que a cavidade consiste quase exclusivamente de vapor, as taxas de crescimento e de colapso e as pressões geradas devido ao colapso da cavidade serão extremamente elevadas e poderão causar danos de monta. Este caso é denominado cavitação vaporosa e se constitui no tipo de cavitação que deverá ser de interesse prático ao engenheiro.

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

Coelho (2006) e Terres (2006) expõem que o fenômeno de cavitação está associado a diversos processos nos quais a mecânica de fluidos está inserida. Por exemplo, “[...] onde ocorrer separação no escoamento, a turbulência se torna muito importante determinando o início da cavitação.” (TULLIS, 1982, p. 1.10). Por isso, a cavitação pode ocorrer em quaisquer dispositivos, tais como, asas de aviões, bombas e turbinas hidráulicas, dissipadores de energia,

condutos pressurizados, nos processos de pasteurização do leite e para limpeza de superfícies sólidas.

Contudo, existem três requisitos fundamentais para a ocorrência da cavitação (TULLIS, 1982, p. 1.5):

[...] deverão existir núcleos no sistema que servem de base para vaporização do líquido, [...] a pressão em algum ponto do líquido deverá cair para ou próximo à pressão de vapor e em terceiro lugar, a pressão do ambiente em volta da cavidade do vapor deverá ser superior a pressão de vapor de forma a provocar sua implosão.

Gontijo e Campos (2005, p. 12) salientam que nas eclusas de navegação os problemas decorrentes da cavitação são mais graves a jusante das comportas controladoras de vazão. Portanto, tanto na hidráulica de enchimento como na de esvaziamento, a região da comporta é um ponto de máxima importância do projeto, pois é através da estrutura elevatória, funcionando corretamente, que se conseguirá realizar o transporte, em condições adequadas, das embarcações. Os mesmos ainda enfatizam que “A região adjacente às válvulas deve ser objeto da mais cuidadosa avaliação no projeto, pois é nesta região que ocorrem as maiores velocidades de todo o circuito, que aliadas a baixas pressões podem levar ao fenômeno da cavitação.”. Dourado (1986, p. 49) estabelece a mesma preocupação com a região a jusante das comportas afirmando que “Os problemas decorrentes da cavitação são observados a jusante das comportas dos condutos de adução e esgotamento, em maior escala e menos importantes nas curvas, derivações e orifícios.”.

A cavitação pode ser classificada em três estágios, cavitação incipiente, crítica e de bloqueio (TULLIS, 1982, p. 4.3; 4.4; 4.6):

**Cavitação Incipiente:** termo frequentemente usado quando se faz referência ao estágio inicial da cavitação. Já que a cavitação se constitui em um processo fortuito, não existe realmente um ponto definitivo de inceptção que separa a faixa não cavitante da cavitante. [...] a intensidade da cavitação nestas condições consiste de estouros leves e intermitentes. Deve-se prestar atenção para distingui-los do ruído do escoamento de fundo.

**Cavitação crítica:** apresenta ruído estacionário, porém leve. A cavitação, em ponto crítico, não será desagradável e não irá reduzir a vida da válvula.

**Cavitação de bloqueio:** na medida em que o escoamento, através de uma válvula, aumenta, a pressão média logo a jusante da válvula eventualmente cai para a pressão de vapor, e a válvula bloqueia. O termo significa que para uma dada pressão a montante, a descarga máxima passa pela válvula. Próximo ao bloqueio, a intensidade da cavitação na válvula (usando-se a intensidade do ruído e da vibração

como medida) alcança a sua intensidade de pico. O escoamento próximo ao bloqueio é instável.

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

#### 4.1 POTENCIAL DE CAVITAÇÃO

Santos (1998, p. 80-81) afirma que inúmeros são os fatores intervenientes no fenômeno da cavitação e no seu desenvolvimento. São exemplos condições geométricas, amplitude de flutuações de pressões, quantidade de partículas ou gás dissolvido, gradientes bruscos espaciais de pressão, pressão média local, velocidades médias e locais, acelerações locais. O mesmo afirma, também, que para análise qualitativa é necessário estabelecer um parâmetro adimensional:

O procedimento usado para análise quantitativa da cavitação é o estabelecimento experimental do comportamento de um parâmetro adimensional, que normalmente é definido pela relação entre forças que previnem a cavitação e forças que causam a cavitação. É fundamental que esse parâmetro seja fácil de ser calculado com valores médios do fluxo, para que se possa proteger contra o fenômeno com simplicidade, convergindo para soluções adequadas, antes de maiores e custosas investigações em modelos.

Santos (1998) indica, portanto, um adimensional  $K$ , típico determinado por:

$$K = \frac{P_V - P_{VG}}{P_U - P_V} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$P_V$  é a pressão a jusante da comporta;

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

$P_U$  é a pressão a montante da comporta.

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

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

Onde:

$P$  é a pressão medida no ponto;

$P_{atm}$  é a a pressão atmosférica;

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

$\rho$  é a massa específica do líquido;

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

Sendo assim, “O índice de cavitação é utilizado para indicar em primeira análise a existência ou não do risco da cavitação junto às comportas.” (DOURADO, 1986, p. 51). Contudo, deve-se tomar cuidado ao usar este índice, pois o valor do índice de cavitação, para o qual a estrutura irá apresentar danos de erosão ou cavitação deve ser o mesmo para estruturas semelhantes e com condições de escoamento similares.

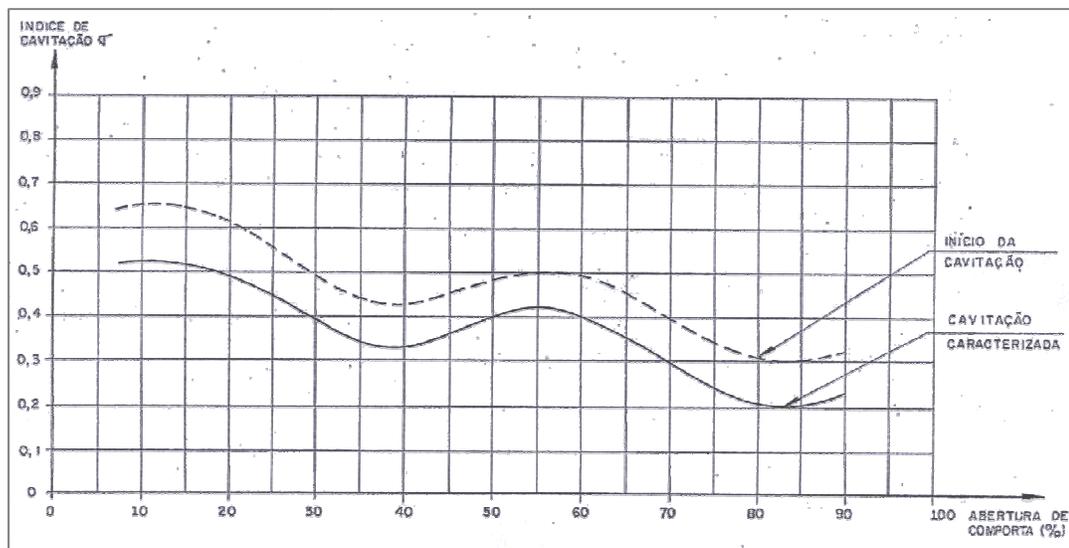
O índice de cavitação pode ser considerado o parâmetro básico de semelhança em escoamentos nos quais o fenômeno ocorra, mas, de acordo com Gikas (1982), não representa condição suficiente de semelhança dinâmica, visto que se baseia em duas hipóteses simplistas:

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

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

Na figura 8 são apresentadas duas curvas do índice de cavitação em função da porcentagem de abertura, estas curvas referem-se a comportas tipo vagão. Não foi encontrado, gráfico semelhante, para comportas tipo segmento invertida na bibliografia consultada. No entanto, a partir desta pode-se distinguir três regiões de ocorrência de cavitação. Na análise de dados do presente trabalho pretende-se inferir curvas semelhantes, para a comporta segmento invertida, baseadas em resultados obtidos no modelo físico utilizado.

Figura 8 – Critério de cavitação para comporta vagão



(fonte: DOURADO, 1986)

Para avaliar, de forma mais real possível, é, ainda, utilizado o coeficiente de contração, o qual fornece o valor da velocidade e pressão na veia contraída, sendo assim “O coeficiente de contração pode ser definido como sendo a razão entre a menor área ocupada pelo jato de água a jusante da comporta e a área de abertura da mesma.” (DOURADO, 1986, p. 55-56). O coeficiente de contração, figura 9, pode ser expresso pela fórmula 3:

$$C_c = \frac{A}{l \cdot \alpha} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

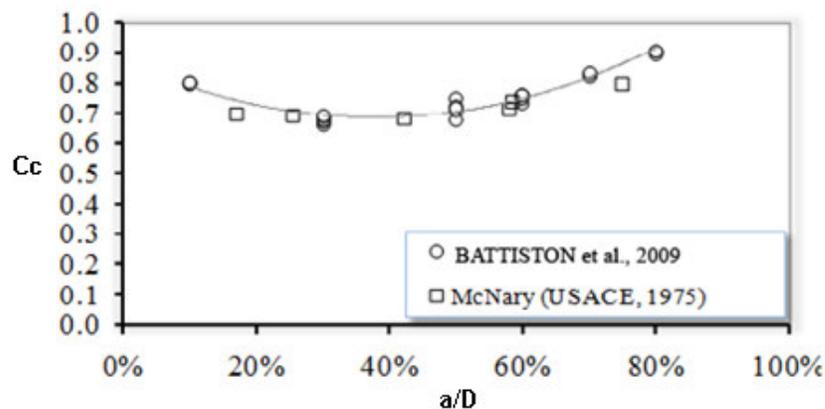
$C_c$  é o coeficiente de contração;

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

$\alpha$  é a abertura da comporta;

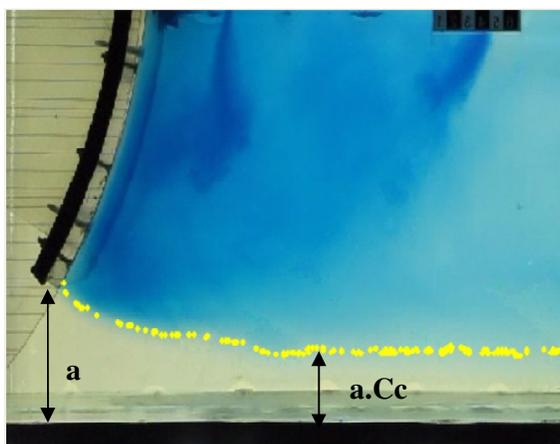
$l$  é a largura do aqueduto.

Figura 9 – Coeficientes de contração na comporta segmento invertida



(fonte: BATTISTON et al., 2009)

A veia contraída, também chamada de *vena contracta*, figura 10, é a região, a jusante da comporta, onde o escoamento sofre a maior contração.

Figura 10 – *Vena contracta*: região de maior velocidade e menores pressões

(fonte: elaborada pela autora)

Dourado (1986, p. 56) enfatiza também que:

O coeficiente de contração depende do grau de abertura da comporta e de suas características geométricas. As investigações realizadas em comportas do tipo *tainter* invertidas utilizadas na grande maioria das eclusas mostram que o coeficiente de contração varia na faixa de 0,65 e 0,9 em função da porcentagem de abertura das comportas.

## 4.2 MEDIDAS MITIGADORAS DE CAVITAÇÃO

Existem diversos estudos que visam obter medidas que evitam ou pelo menos diminuem os efeitos danosos da cavitação, os quais serão abordados na sequência no trabalho. Dentre as medidas podem ser citadas:

- a) encamisamento (blindagem) com material mais resistente à erosão ou cavitação;
- b) aeração (introdução de ar no escoamento);
- c) mudança na geometria do conduto;
- d) leis de manobra especiais para a abertura da comporta.

### 4.2.1 Encamisamento com material resistente à cavitação

É importante o encamisamento das partes da válvula e da tubulação nos trechos submetidos aos efeitos da cavitação, com aço inoxidável ou com outro material resistente. Esta solução tolera a cavitação e evita a erosão da superfície (TULLIS, 1982). A grande desvantagem deste método é o alto custo.

### 4.2.2 Aeração

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

### **4.2.3 Mudança na geometria do conduto**

Expansões no teto da galeria, que se localizam até 5 vezes a altura da válvula para jusante, aumentam a perda de carga na válvula implicando num potencial de cavitação menor. Recomenda-se que, as expansões graduais no teto não excedam 1/10 (SANTOS, 1998).

### **4.2.4 Leis de manobra especiais para a abertura da comporta**

Santos (1998) sugere aberturas diferenciadas visando a menor permanência da comporta na situação mais crítica. Todavia, tem-se como desvantagem, das leis de manobra especiais, as limitações de capacidade dos equipamentos de acionamento e a determinadas situações que causariam esforços hidrodinâmicos excessivos (trabalho não publicado)<sup>3</sup>.

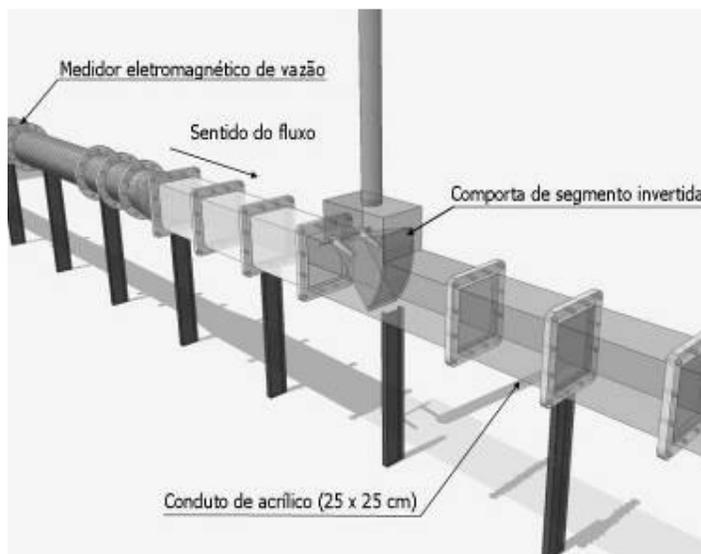
---

<sup>3</sup> Foi consultado o Projeto de Tese de Doutorado de Cristiane Collet Battiston, para o exame de qualificação, intitulado de Estudo do escoamento a Jusante de Válvulas de Eclusa, visando à supressão de cavitação sem adição de ar. O doutoramento está sendo realizado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2008.

## 5 METODOLOGIA DE PESQUISA

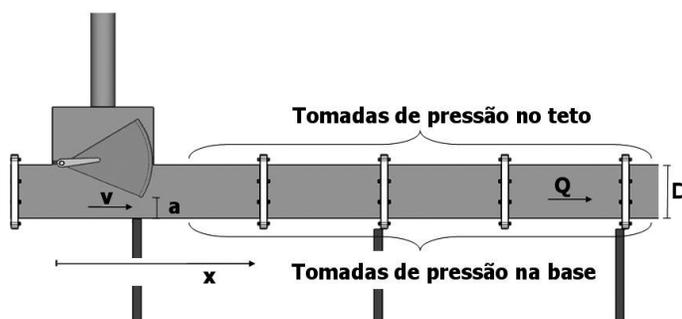
Os dados experimentais utilizados neste trabalho foram obtidos em modelo físico de uma comporta utilizada em eclusa de navegação localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS. Os ensaios foram realizados em um modelo hidráulico de laboratório, na escala 1:16, baseado na concepção das eclusas das usinas hidrelétrica Tucuruí e de Santo Antônio, a partir das quais foram efetuadas adaptações, de forma a conceber um projeto para uma eclusa genérica, mesclando características de uma e de outra. Um esquema do modelo que contempla um aqueduto no qual está instalada a comporta pode ser conferido na figura 11. Na figura 12 são apresentadas as principais variáveis mensuráveis no projeto e, na figura 13, pode-se verificar a direção do fluxo e a zona do escoamento mais crítica.

Figura 11 – Esquema do modelo utilizado para obtenção dos dados



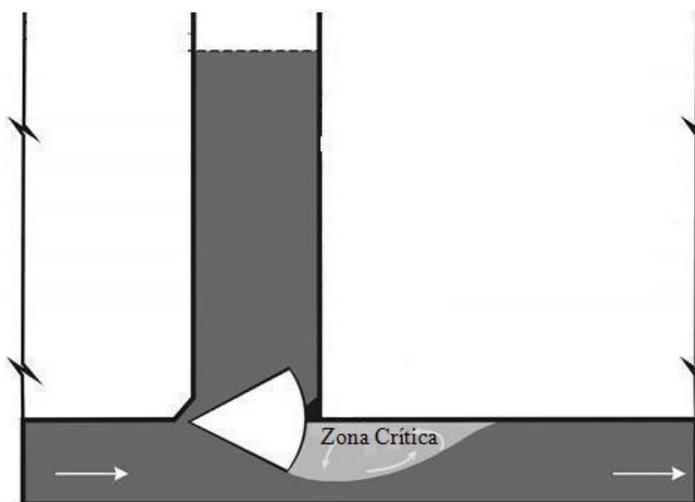
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 12 – Esquema com as principais variáveis mensuráveis



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 13 – Fluxo através da comporta



(fonte: elaborada pela autora)

A instalação é composta por um sistema de alimentação, de seção circular com diâmetro nominal de 250 mm, no qual estão associados: um medidor de vazão eletromagnético e duas bombas (25 e 50 CV) com inversor de frequência que permitem aduzir as diferentes vazões ensaiadas. Compõe a bancada de ensaios, também, um conduto principal, de seção quadrada com aresta de 0,25 m e 8,9 m de comprimento, onde está instalada a comporta, sendo neste trecho realizadas as medições. A comporta é do tipo segmento invertida, com raio de 0,38 m. Faz parte do sistema, ainda, uma chaminé de equilíbrio com altura de 2,50 m e um reservatório de jusante com volume total de 7,2 m<sup>3</sup>, que tem como função manter o escoamento afogado.

Durante a execução dos ensaios foram registradas as pressões médias e instantâneas, grau de abertura da comporta e vazão, de acordo com os sistemas descritos a seguir.

As pressões médias foram registradas com a utilização de piezômetros imediatamente a jusante da comporta, tanto na base como no teto da tubulação, com os espaçamentos entre as tomadas de pressão variando entre 5 e 20 cm. As tomadas de pressão e um dos quadros dos piezômetros podem ser visualizadas na figura 14. As pressões instantâneas foram adquiridas por meio de transdutores de pressão, cujas características são descritas no quadro 2, alocados, também, na base e no teto do conduto, figura 15. Na figura 16, é apresentado o modelo no qual foram adquiridos os dados.

Figura 14 – Medição de pressões médias por meio de piezômetros



(fonte: elaborada pela autora)

Quadro 2 – Características dos transdutores de pressão

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

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 15 – Transdutores de pressão, a jusante da comporta, utilizados para medir as pressões instantâneas



(fonte: foto da autora)

Figura 16 – Modelo utilizado para aquisição de dados



(fonte: foto da autora)

Para cada condição de ensaio (vazão e abertura de comporta), foram adquiridos dados durante dez minutos com frequência de 512 Hz. Os sinais dos transdutores foram medidos através de uma placa de conversão analógico-digital *National Instruments*, modelo NI-USB 6225 de 16 bits, permitindo a aquisição e registros dos valores de pressão.

A indicação do grau de abertura da comporta foi realizada por um semicírculo de travamento da comporta que se encontra junto ao eixo da comporta, girando com o mesmo. Este é graduado segundo o grau de abertura correspondente, e uma agulha vertical fixa à estrutura de sustentação foi responsável pela indicação do grau de abertura estabelecido durante os ensaios.

A vazão foi registrada por meio de um macromedidor eletromagnético de vazão *Rosemount*, diâmetro 250 mm, faixa de medição de 15,56 l/s a 465,28 l/s. A precisão na leitura é de  $\pm 0,5\%$  do índice de 0,3 a 10 m/s, abaixo de 0,3 m/s o sistema tem precisão de  $\pm 0,0015$  m/s.

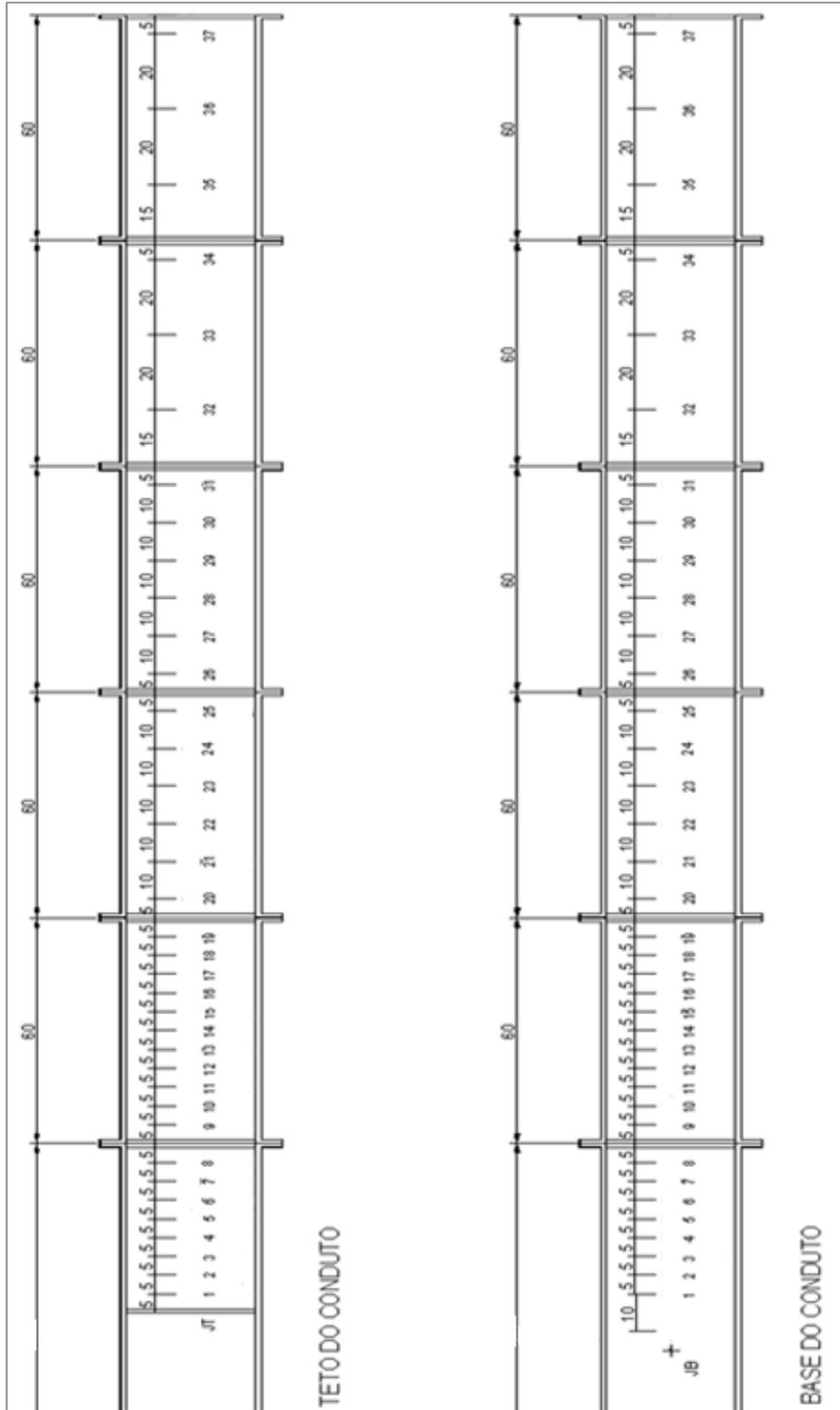
Os ensaios foram realizados em regime permanente para diferentes graus de abertura da comporta e carga hidráulica de montante. Não foi permitida a entrada de ar na tubulação a jusante da comporta, durante os ensaios. A saída do conduto de jusante esteve, em todos os experimentos, submersa a um nível mínimo que garantia a tranquilidade do plano da superfície de água. O quadro 3 mostra as vazões e as porcentagens de abertura ensaiadas e a figura 17 mostra a posição dos equipamentos utilizados para medir as pressões.

Quadro 3 – Resumos dos ensaios.

Vazão (l/s)	Aberturas								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	100%
22	x	x	x	x	x	x	x	x	x
32	x	x	x	x	x	x	x	x	x
40			x	x	x	x	x	x	x
60			x	x	x	x	x	x	x
80			x	x	x	x	x	x	x

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 17 – Posição dos equipamentos de medição de pressão ao longo do conduto



(fonte: elaborado pela autora)

## 6 ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo é destinado à apresentação dos resultados, obtidos nos ensaios de laboratório, por meio de gráficos e equações propostas. Serão apresentados os resultados da base do conduto juntamente com os do teto. São apresentados os comportamentos das pressões médias ( $P_{\text{média}}$ ), pressões com probabilidade 1 % ( $P_{1\%}$ ) e 0,1 % ( $P_{0,1\%}$ ) de serem inferiores a um determinado valor. Consideraram-se as probabilidades de ocorrência de 1% e de 0,1% como representativas das pressões mínimas que podem ocorrer a jusante da comporta para uma certa vazão e abertura. As amostras em cada tomada de pressão foram obtidas durante 10 minutos, com uma frequência de 512 Hz.

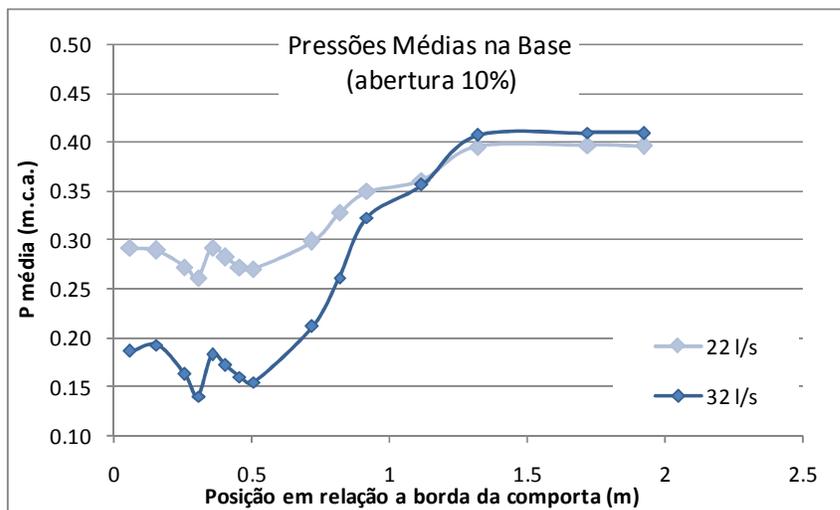
### 6.1 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES MÉDIAS

Neste item são apresentados os comportamentos das pressões médias a jusante da comporta tipo.

#### 6.1.1 Comportamento das pressões médias na base do conduto

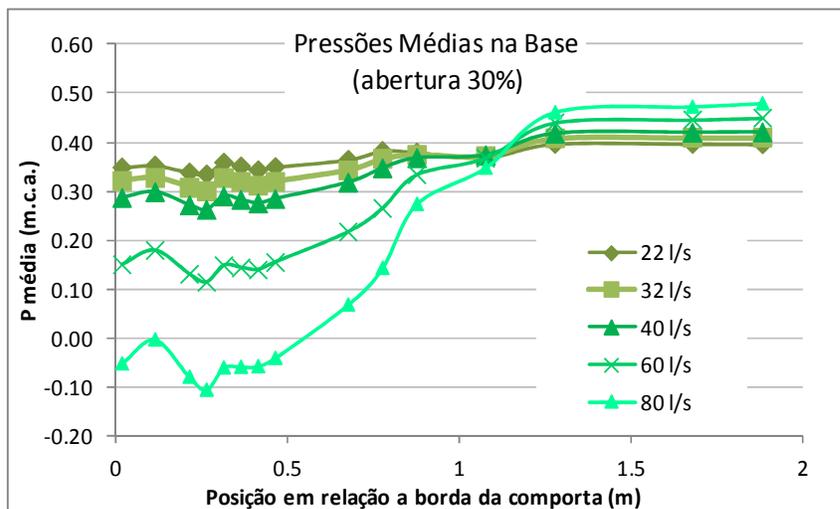
Para a análise do comportamento da pressão média junto à base, os dados foram apresentados em função da sua posição longitudinal ao longo da base do conduto. As figuras 18 a 20 apresentam o comportamento das pressões, na base do conduto, a jusante da comporta para aberturas de 10%, 30% e 100%. Na figura 21 são apresentadas as pressões para uma mesma vazão e diferentes porcentagens de abertura. O comportamento das pressões, para as demais aberturas, pode ser encontrado no Apêndice A.

Figura 18 – Comportamento das pressões na base com a comporta operando com 10% de abertura



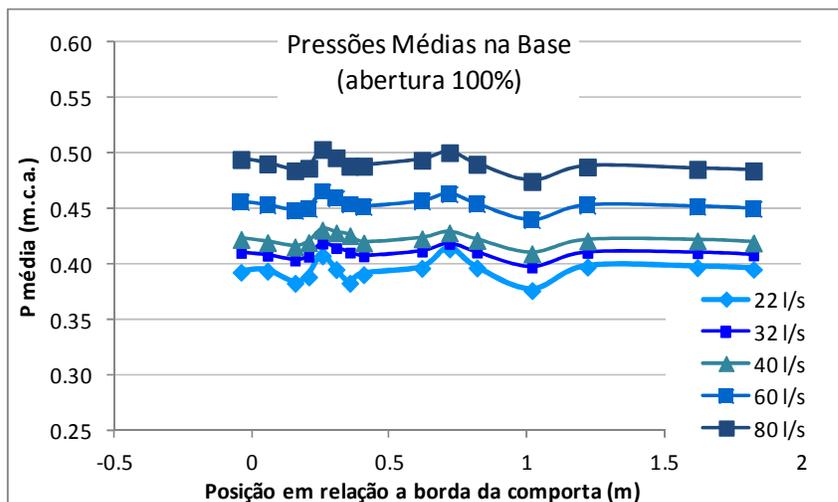
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 19 – Comportamento das pressões com na base com a comporta operando com 30% de abertura



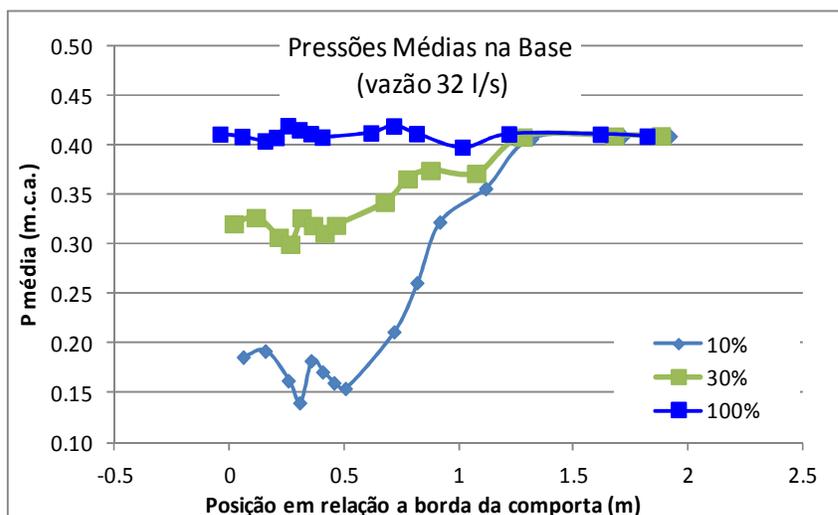
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 20 – Comportamento das pressões com na base com a comporta operando com 100 % de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 21 – Comportamento das pressões na base para uma mesma vazão, 32 l/s, e porcentagens de aberturas diferentes.



(fonte: elaborada pela autora)

Partindo da análise das figuras apresentadas, percebe-se que as pressões médias junto à base:

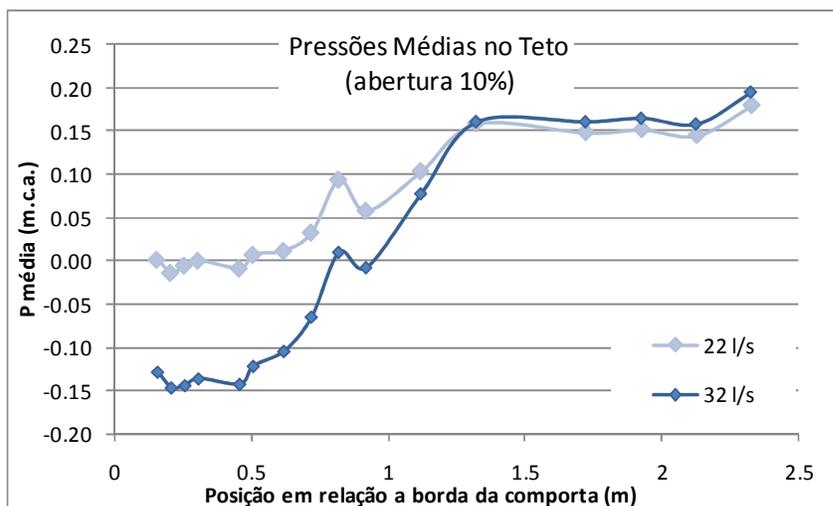
- apresentam valores mínimos logo a jusante da comporta e se estendem por uma certa distância para depois aumentarem. Esta distância depende da abertura e da vazão (figuras 18 a 21);
- à medida que a porcentagem de abertura da comporta aumenta, as pressões também aumentam (figura 21).
- são inversamente proporcionais as vazões, ou seja, se a vazão aumenta, o valor da pressão média diminui (figuras 18 e 19). Entretanto, para abertura de 100 %

isto não ocorre (figura 20), menores vazões menores pressões, em função da pressão atuante no conduto.

### 6.1.2 Comportamento das pressões médias no teto do conduto

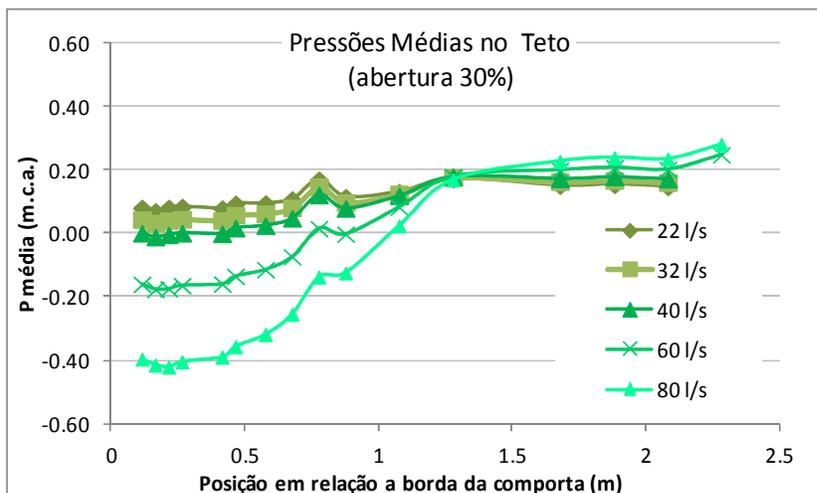
As figuras 22 a 25 apresentam as pressões médias obtidas junto ao teto do conduto para aberturas de 10%, 30% e 100%. Os dados, da mesma maneira que na base, também estão apresentados em função da sua posição longitudinal de modo a permitir a análise do seu comportamento. Os resultados para as demais aberturas podem ser encontrados no Apêndice A.

Figura 22 – Comportamento das pressões no teto com a comporta operando com 10% de abertura



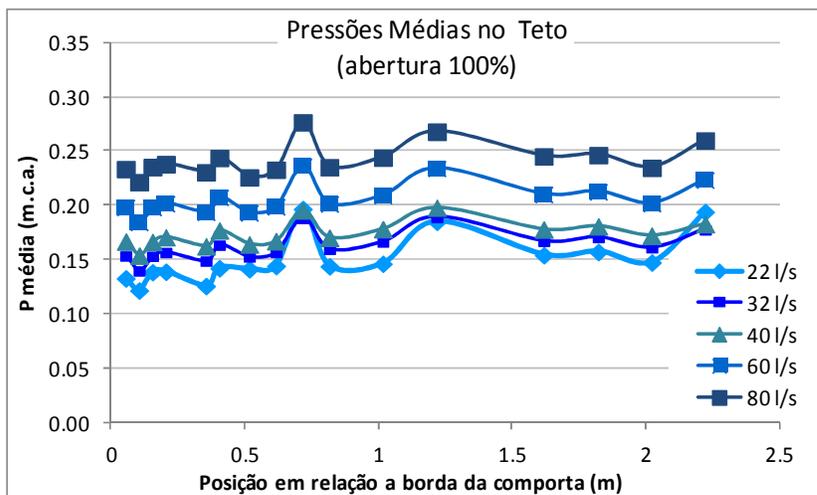
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 23 – Comportamento das pressões no teto com a comporta operando com 30% de abertura



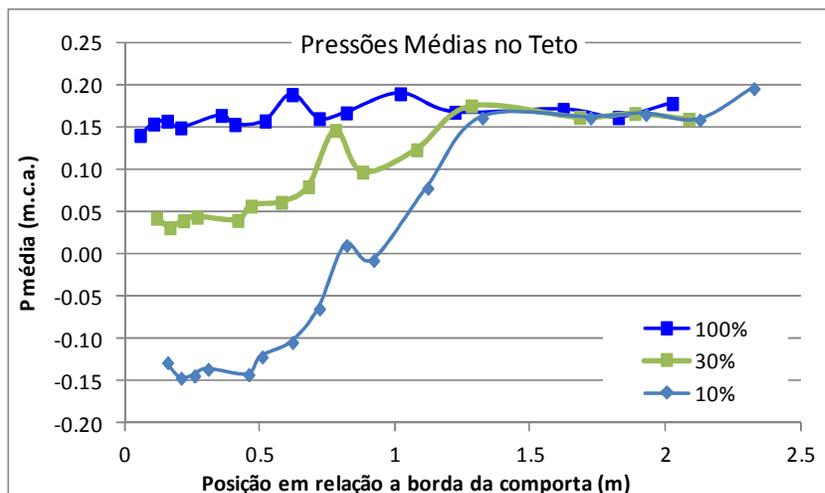
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 24 – Comportamento das pressões no teto com a comporta operando com 100% de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 25 – Comportamento das pressões no teto para uma mesma vazão, 32 l/s, e porcentagens de aberturas diferentes.

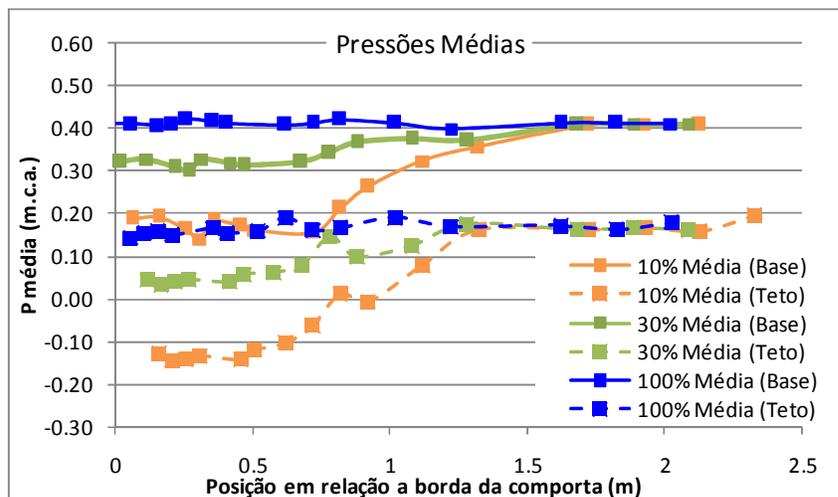


(fonte: elaborada pela autora)

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

- a) tem comportamento semelhante ao que ocorre na base, mas com valores distintos (figura 26);
- b) ocorrem logo a jusante da comporta e se estendem por uma certa distância para depois aumentarem. Esta distância depende da abertura e da vazão (figuras 22 a 25);
- c) para uma mesma vazão, são diretamente proporcionais as aberturas, ou seja, se a abertura aumenta o valor da pressão média mínima aumenta (figura 25);
- d) para uma mesma abertura, são inversamente proporcionais a vazão, ou seja, se a vazão aumenta o valor da pressão média mínima diminui (figuras 22 e 23). Entretanto, para a abertura de 100% isto não ocorre (figura 24), em função da pressão atuante no conduto.

Figura 26 – Comparativo entre as pressões registradas na base e no teto do conduto para vazão passante de 32 /s



(fonte: elaborada pela autora)

## 6.2 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES MÍNIMAS COM PROBABILIDADE DE 1% (P<sub>1%</sub>)

O comportamento das pressões mínimas, com probabilidade de 1% de serem menores que certo valor ( $P_{1\%}$ ) está apresentado nas figuras 27 a 32. Os valores das pressões de  $P_{1\%}$  estão plotados *versus* a posição do transdutor em relação à borda da comporta.

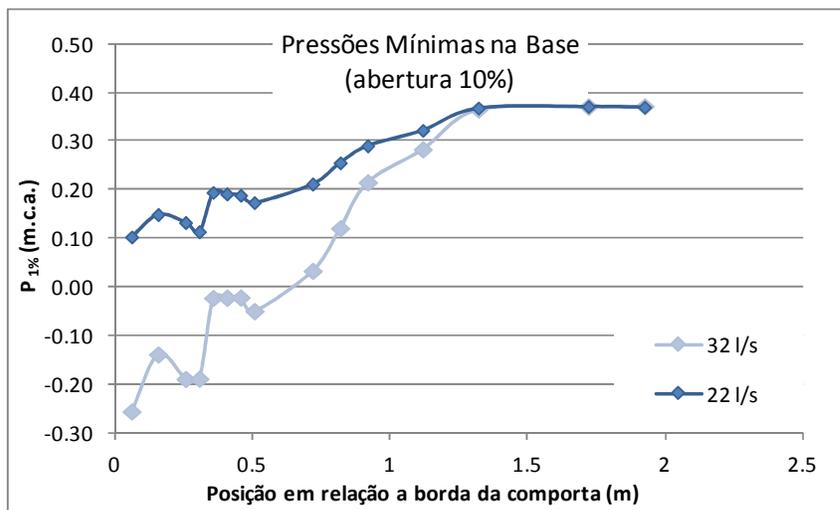
Usou-se a probabilidade de ocorrência das pressões, pois o valor absoluto mínimo não seria representativo para uma amostra de 10 minutos, já a probabilidade fornece uma região em que as pressões podem ou não ocorrer, ou serem menores que determinado valor.

### 6.2.1 Comportamento das pressões mínimas ( $P_{1\%}$ ) na base do conduto

Para a análise do comportamento das pressões mínimas junto à base, os dados foram apresentados em função da sua posição longitudinal ao longo da base do conduto. As figuras 27 a 29 apresentam o comportamento das pressões para aberturas de 10%, 30% e 100%. O comportamento para as demais aberturas pode ser encontrado no Apêndice A.

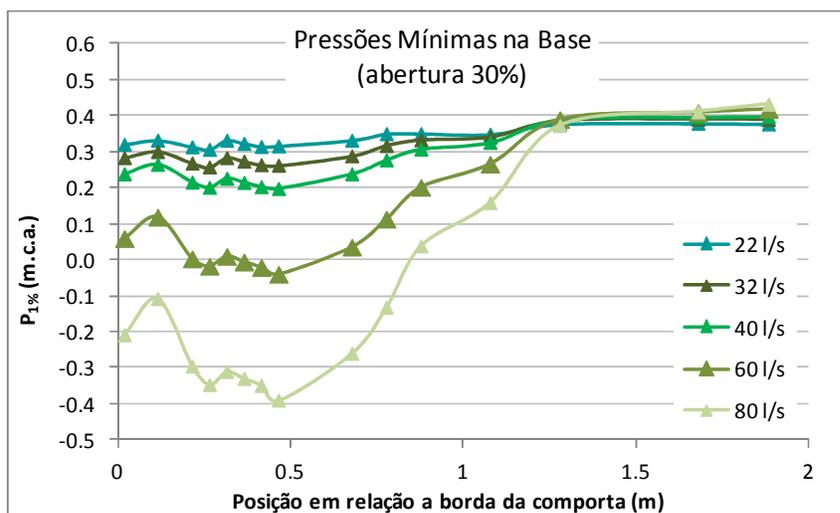
A partir da análise das figuras percebe-se que o comportamento das pressões mínimas seguem a mesma tendência que para as pressões médias, no entanto observa-se que os valores são menores.

Figura 27 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$  na base com a comporta operando com 10% de abertura



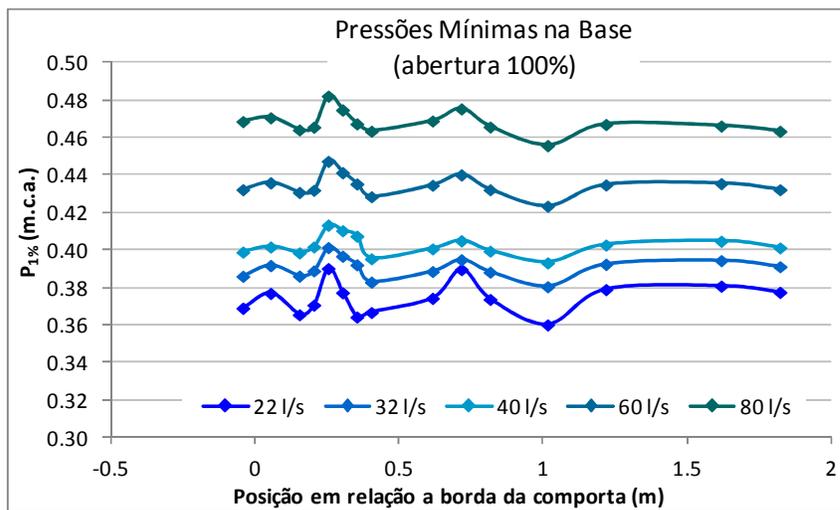
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 28 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$  na base, com a comporta operando com 30% de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 29 – Comportamento das pressões,  $P_{1\%}$  na base, com a comporta operando com 100% de abertura

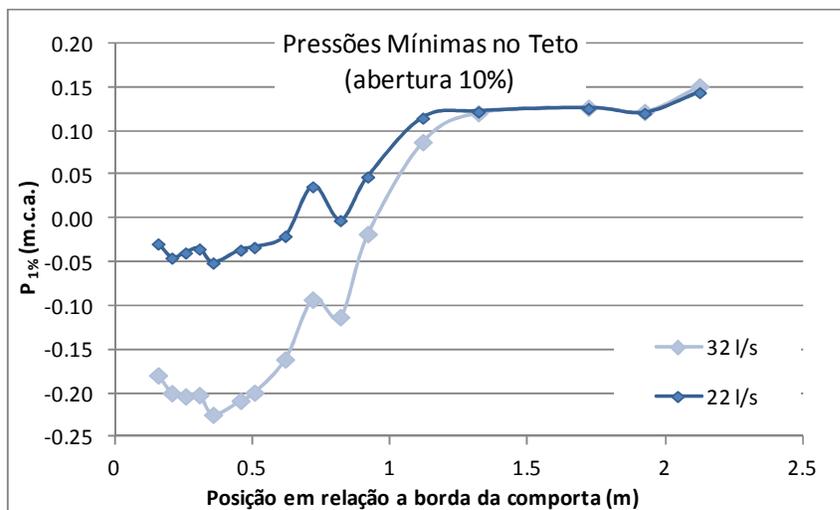


(fonte: elaborada pela autora)

## 6.2.2 Comportamento das pressões mínimas ( $P_{1\%}$ ) no teto do conduto

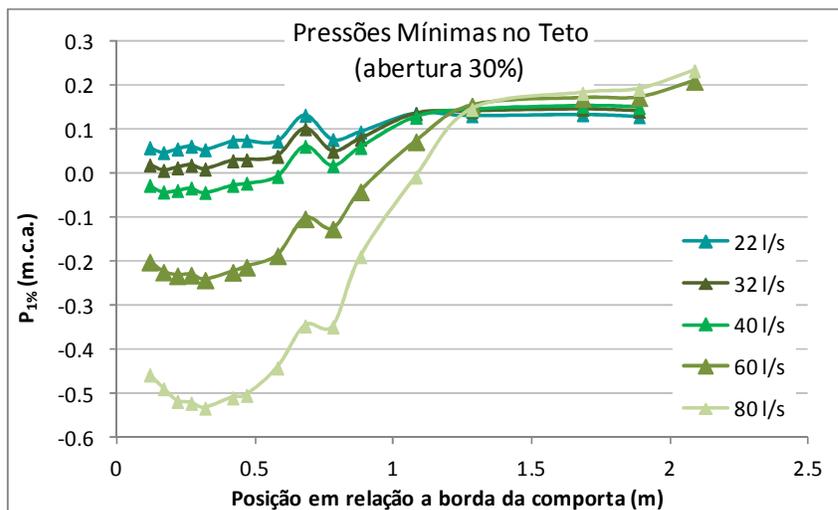
As figuras 30 a 32 apresentam as pressões mínimas obtidas junto ao teto do conduto para aberturas de 10%, 30% e 100%. Os resultados para as demais aberturas podem ser encontrados no Apêndice A.

Figura 30 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$  no teto, com a comporta operando com 10% de abertura



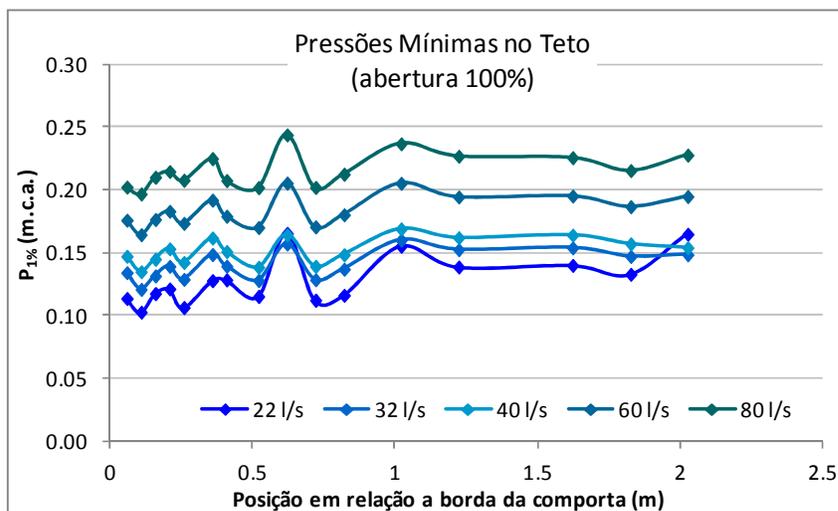
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 31 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$  no teto, com a comporta operando com 30% de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 32 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$  no teto, com a comporta operando com 100% de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

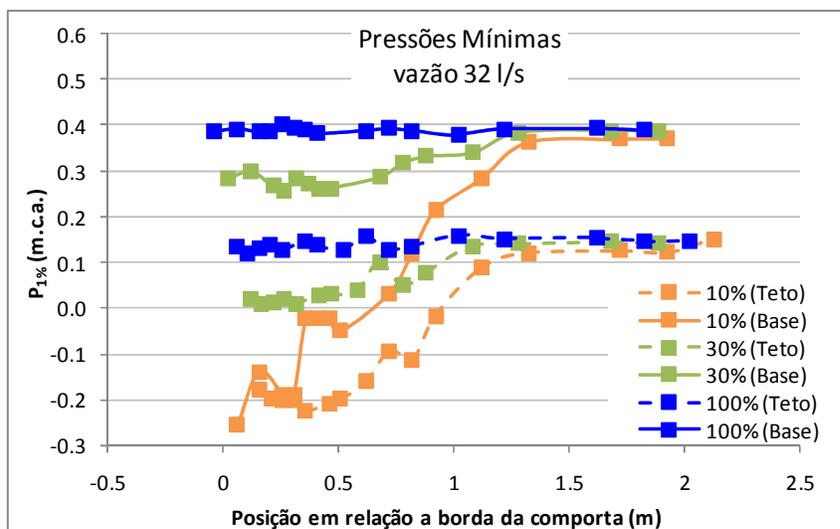
Partindo da análise das figuras apresentadas, tanto para a base como para o teto, percebe-se que as pressões  $P_{1\%}$ :

- apresentam comportamento semelhante ao das pressões médias, mas com valores inferiores;
- apresentam valores mínimos imediatamente a jusante da comporta e se estendem por uma certa distância para depois aumentarem. Esta distância

depende da abertura e da vazão (figuras 27 a 29 para a base e 30 a 32 para o teto);

- c) para uma mesma vazão, são diretamente proporcionais a abertura, ou seja, se a abertura aumenta o valor da pressão aumenta (figura 33);
- d) para uma mesma abertura, são inversamente proporcionais a vazão, ou seja, se a vazão aumenta o valor da pressão mínima diminui (figuras 27 e 28 para a base e 30 e 31 para o teto). Entretanto, para abertura de 100 % isto não ocorre (figura 29 para a base e 32 para o teto), menores vazões menores pressões, em função da pressão atuante no conduto;
- e) no teto apresentam valores inferiores (menores) aos da base.

Figura 33 – Comportamento das pressões  $P_{1\%}$  para a vazão de 32 l/s com diferentes aberturas



(fonte: elaborada pela autora)

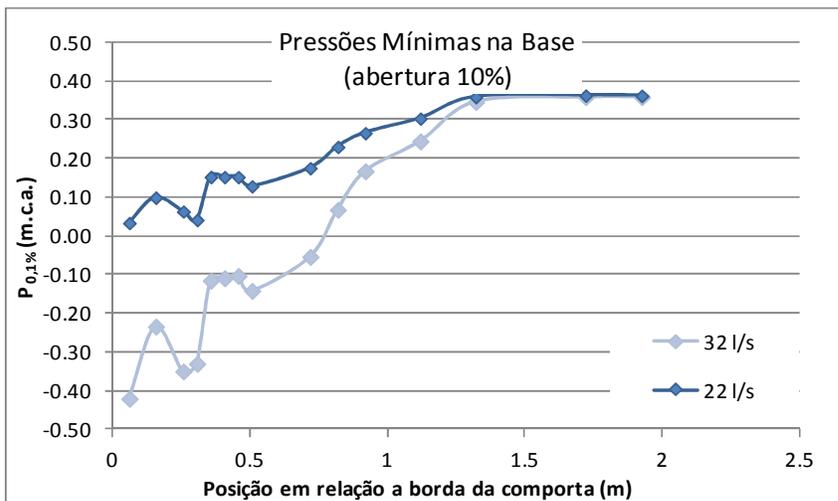
### 6.3 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES MÍNIMAS EXTREMAS ( $P_{0,1\%}$ )

Para estudar o comportamento das pressões extremas mínimas, optou-se em trabalhar com os valores das pressões que tem a probabilidade de 0,1% de serem menores que certo valor ( $P_{0,1\%}$ ). A razão pela qual se trabalhou com as probabilidades já foi explanada no subtítulo 6.2.

#### 6.3.1 Comportamento das pressões mínimas extremas ( $P_{0,1\%}$ ) na base do conduto

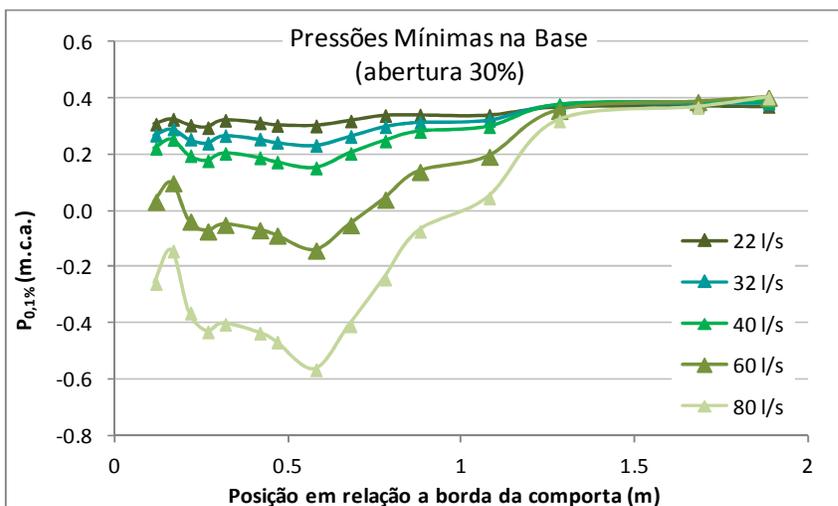
Estes dados são apresentados *versus* a posição longitudinal ao longo da base do conduto. As figuras 34, 35 e 36 apresentam o comportamento das pressões mínimas extremas para a base.

Figura 34 – Comportamento das pressões  $P_{0,1\%}$  na base, com a comporta operando com 10% de abertura



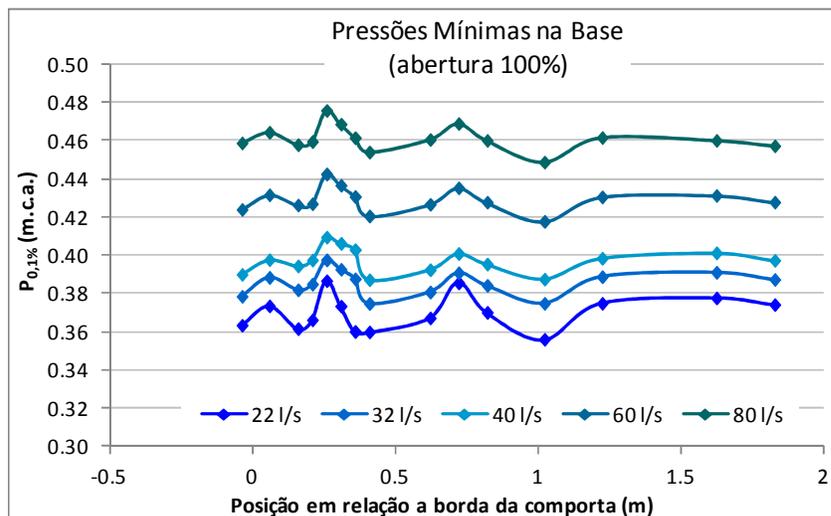
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 35 – Comportamento das pressões mínimas  $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 30% de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 36 – Comportamento das pressões  $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 100% de abertura



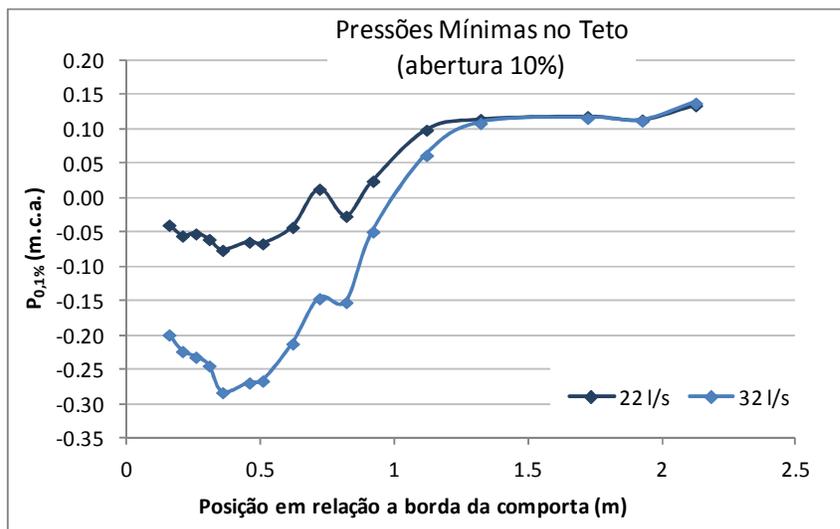
(fonte: elaborada pela autora)

### 6.3.2 Comportamento das pressões mínimas extremas ( $P_{0,1\%}$ ) no teto do conduto

As pressões mínimas extremas são apresentadas *versus* a posição longitudinal ao longo do teto do conduto nas figuras 37 a 39. Partindo da análise das figuras 34 a 36, base do conduto, e 37 a 39, teto do conduto, percebe-se que as pressões  $P_{1\%}$ :

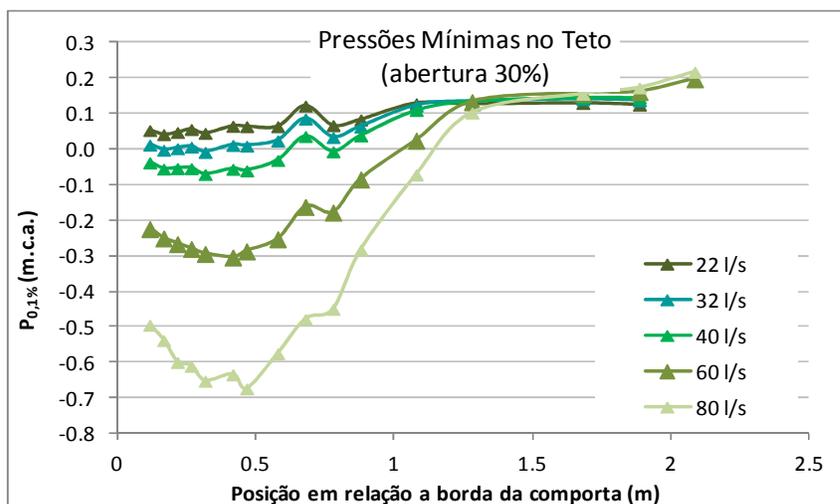
- apresentam comportamento semelhante ao das pressões médias, mas com valores inferiores;
- ocorrem logo a jusante da comporta e se estendem por uma certa distância para depois aumentarem. Esta distância depende da abertura e da vazão (figuras 34 a 36 para a base e 37 a 39 para o teto);
- para uma mesma abertura, são inversamente proporcionais a vazão, ou seja, se a vazão aumenta o valor da pressão mínima diminui (figuras 34 e 35 para a base e 37 e 38 para o teto). No entanto, para abertura de 100% isto não ocorre (figura 36 para a base e 39 para o teto) em função da pressão atuante no conduto;
- no teto apresentam valores inferiores (menores) aos da base.

Figura 37 – Comportamento das pressões  $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 10% de abertura



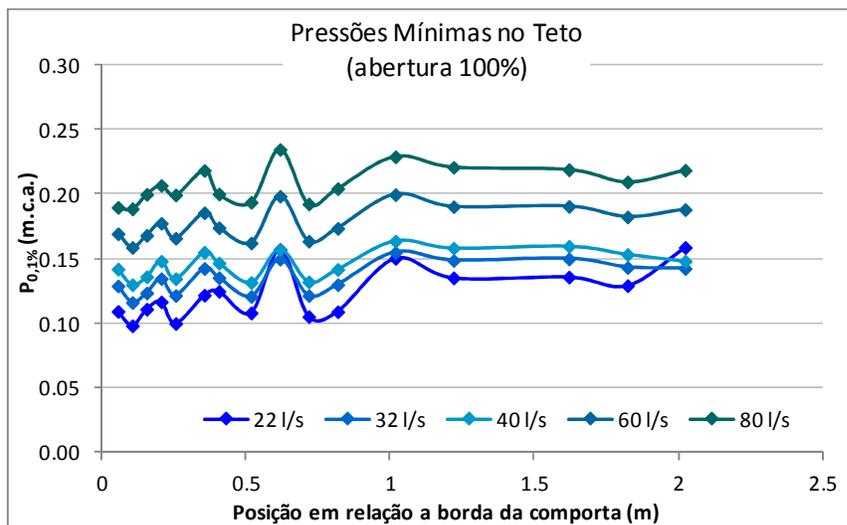
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 38 – Comportamento das pressões  $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 30% de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

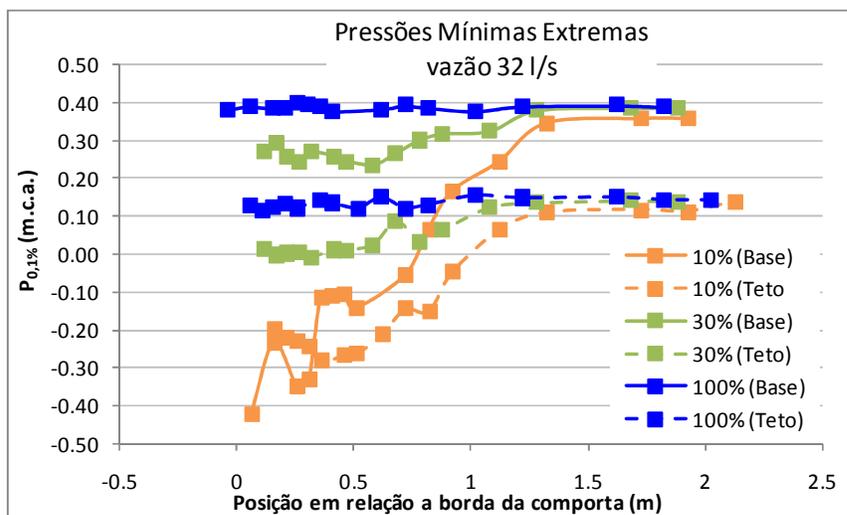
Figura 39 – Comportamento das pressões  $P_{0,1\%}$ , com a comporta operando com 100% de abertura



(fonte: elaborada pela autora)

Na figura 40 percebe-se que para uma mesma vazão os valores das pressões mínimas aumentam à medida que a porcentagem de abertura aumenta.

Figura 40 – Comportamento das pressões para vazão de 32 l/s



(fonte: elaborada pela autora)

## 6.4 ESTIMATIVA DAS PRESSÕES MÍNIMAS A JUSANTE DA COMPORTA

Através da análise dos dados obtidos nos ensaios foi possível generalizar os resultados de maneira a permitir uma estimativa dos valores das pressões mínimas que podem ocorrer a jusante da comporta para as diferentes condições de contorno. Uma forma bastante usual de representar adimensionalmente as pressões é feita por meio do cálculo do índice de cavitação, como foi apresentado pela fórmula 2. Neste trabalho foi usado o índice de forma modificada ( $\sigma_{\text{mod}}$ ), como mostra a fórmula 4. Cabe salientar que este índice representa, na realidade, um coeficiente de pressão. Este índice será apresentado em função de um, também adimensional, parâmetro, denominado de  $A_M$  (fórmula 5), que considera a razão da celeridade<sup>4</sup> com a velocidade do fluxo na veia e, ainda, a porcentagem de abertura da comporta. O uso de adimensionais tolera que os resultados sejam usados da forma mais ampla possível, visto que permitem determinar o comportamento real do fenômeno com base nos modelos reduzidos:

$$\sigma_{\text{mod}} = \frac{P}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} \quad (\text{fórmula 4})$$

$$A_M = \frac{c}{V} \cdot \sqrt{\frac{a}{D}} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

P é a pressão no ponto considerado (mca);

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

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

a é a abertura da comporta (m);

D é a altura do conduto (m);

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

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

<sup>4</sup> Celeridade é a velocidade com que uma onda de pressão se propaga num fluido.

$K_2$  é o módulo de elasticidade da água ( $21,39 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ );

$E$  é o módulo de elasticidade do material do conduto, neste caso, o material do conduto foi acrílico ( $3,5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ );

$e$  é a espessura do conduto.

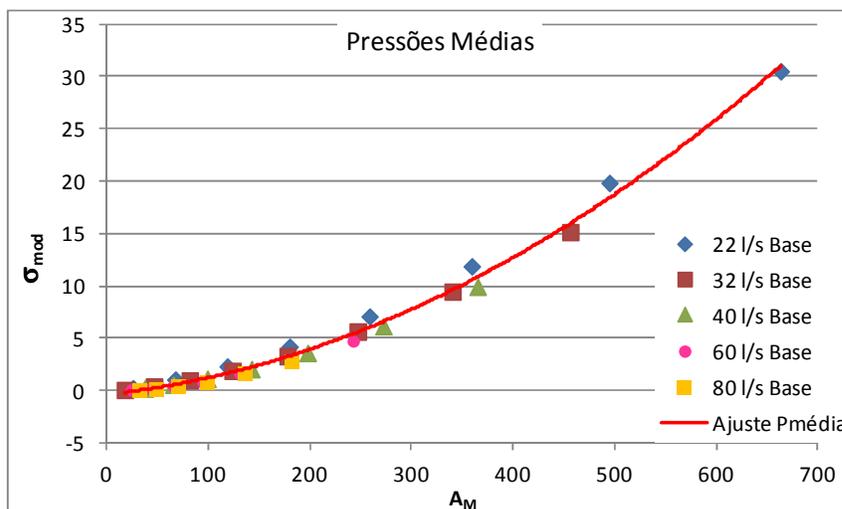
$$c = \sqrt[2]{\frac{1}{\rho \cdot \left( \frac{1}{K_2} + \frac{D}{E \cdot e} \right)}} \quad (\text{fórmula 6})$$

Na sequência são apresentados os valores adotados para os adimensionais citados, tanto para a base como para o teto, e os ajustes sugeridos que podem auxiliar na determinação das pressões que ocorrem a jusante das comportas tipo segmento invertidas em eclusas de navegação.

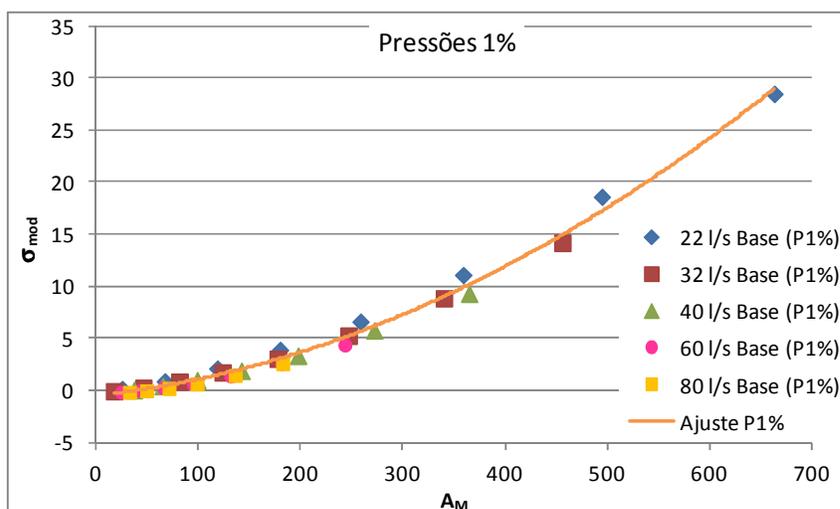
#### 6.4.1 Parâmetros adimensionais para o caso da base do conduto

Nas figuras 41 a 43 são apresentadas, respectivamente, as variações dos índices de pressões média ( $\sigma_{\text{mod med}}$ ), de pressões com 0,1% de probabilidade de ser inferior que certo valor ( $\sigma_{\text{mod } 0,1\%}$ ) e de pressões 1% de probabilidade de ser inferior que certo valor ( $\sigma_{\text{mod } 1\%}$ ).

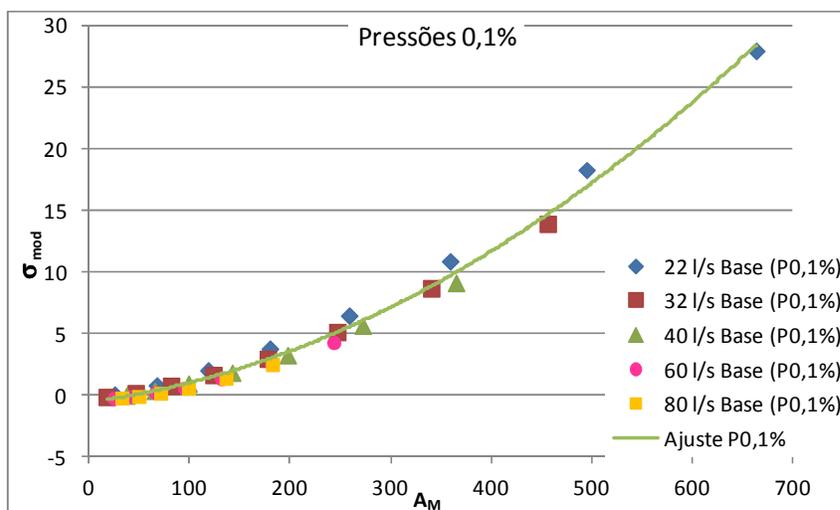
Figura 41 –  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões médias na base



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 42 –  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões 1% na base

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 43 –  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões 0,1% na base

(fonte: elaborada pela autora)

Analisando-se as figuras 41 a 43 observa-se que estes adimensionais apresentam um bom agrupamento dos resultados e podem ser representados pelas fórmulas sugeridas (fórmulas 7, 8 e 9):

$$\sigma_{\text{mod med}} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0104 \cdot A_M - 0,3862 \quad R^2 = 0,992 \quad (\text{fórmula 7})$$

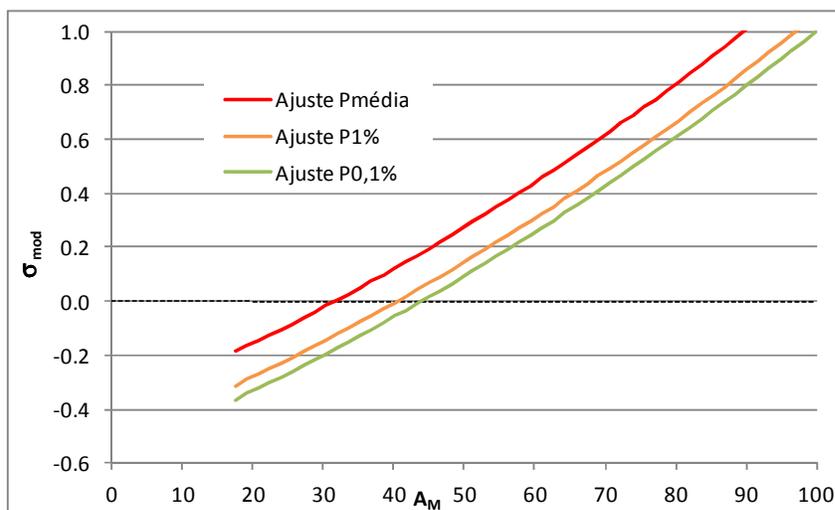
$$\sigma_{\text{mod } 1\%} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0105 \cdot A_M - 0,5126 \quad R^2 = 0,992 \quad (\text{fórmula 8})$$

$$\sigma_{\text{mod } 0,1\%} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0107 \cdot A_M - 0,5659 \quad R^2 = 0,992 \quad (\text{fórmula 9})$$

Ainda pode-se salientar que:

- a) os valores de  $\sigma_{\text{mod med}}$ ,  $\sigma_{\text{mod } 1\%}$  e  $\sigma_{\text{mod } 0,1\%}$ , são muito próximos, no entanto os valores de  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões médias, são ligeiramente superiores aos  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões 1% e 0,1%;
- b) os valores de  $\sigma_{\text{mod}}$  são negativos para (figura 44):
  - $A_M \leq 32$  para pressão média;
  - $A_M \leq 41$  para pressão 1%;
  - $A_M \leq 44$  para pressão 0,1%.

Figura 44 – Detalhe dos valores de  $\sigma_{\text{mod}}$  em função do parâmetro  $A_M$  para a base do conduto

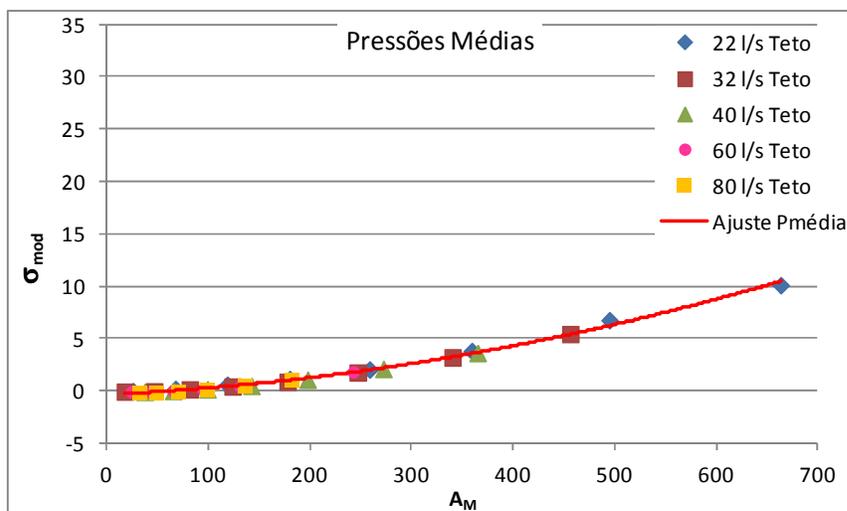


(fonte: elaborada pela autora)

### 6.4.2 Parâmetros adimensionais para o caso do teto do conduto

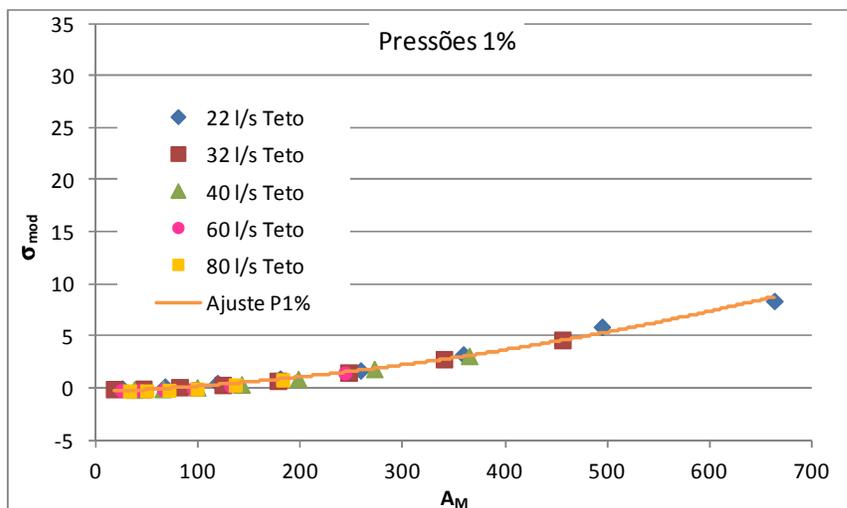
Nas figuras 45 a 47 são apresentadas, respectivamente, as variações dos índices de pressão média ( $\sigma_{\text{mod med}}$ ), de pressão com 0,1% de probabilidade de ser inferior que certo valor ( $\sigma_{\text{mod } 0,1\%}$ ) e de pressão com 1% de probabilidade de ser inferior que certo valor ( $\sigma_{\text{mod } 1\%}$ ).

Figura 45 –  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões médias no teto

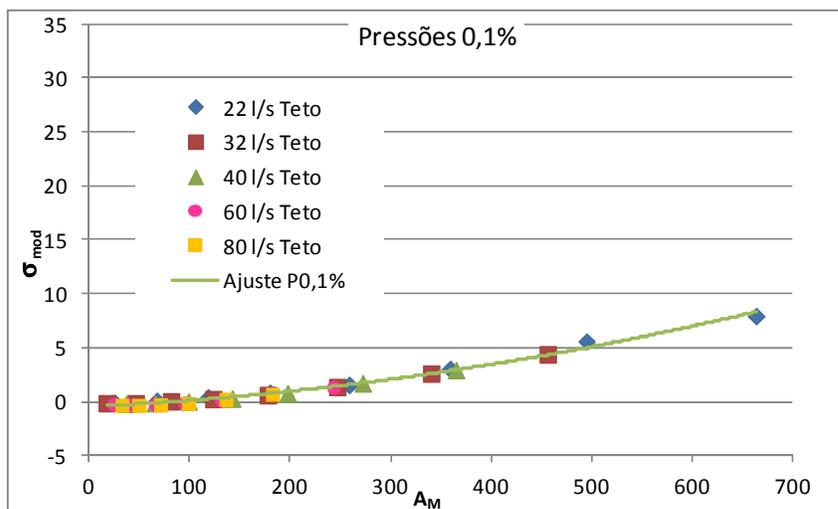


(fonte: elaborada pela autora)

Figura 46 –  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões 1% no teto



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 47 –  $\sigma_{\text{mod}}$  para pressões 0,1% no teto

(fonte: elaborada pela autora)

Analisando-se as figuras 45 a 47 observa-se que estes adimensionais também apresentam um bom agrupamento dos resultados e podem ser representados pelas fórmulas de número 10, 11 e 12:

$$\sigma_{\text{mod med}} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0045 \cdot A_M - 0,3785 \quad R^2 = 0,994 \quad (\text{fórmula 10})$$

$$\sigma_{\text{mod 1\%}} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0046 \cdot A_M - 0,4359 \quad R^2 = 0,991 \quad (\text{fórmula 11})$$

$$\sigma_{\text{mod 0,1\%}} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot A_M^2 + 0,0045 \cdot A_M - 0,4724 \quad R^2 = 0,990 \quad (\text{fórmula 12})$$

Ainda deve-se salientar que:

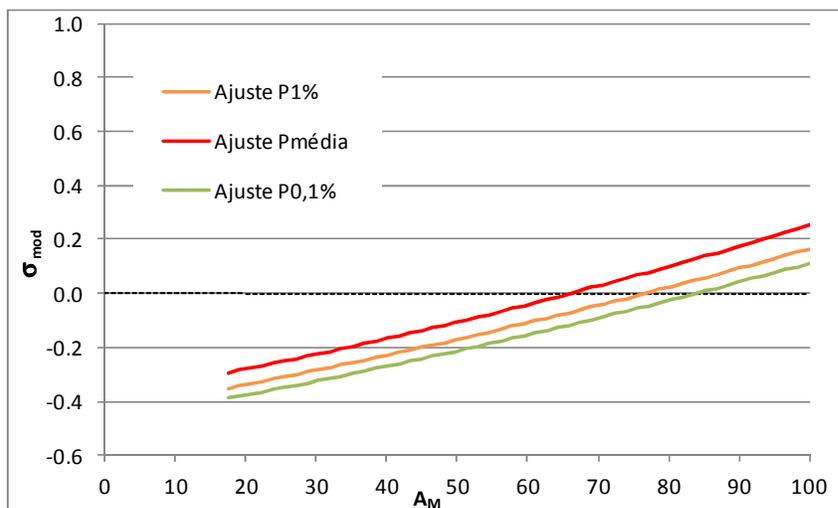
a) os valores de  $\sigma_{\text{mod}}$  apresentam valores muito próximos, no entanto os valores para pressão média, em geral, são superiores em 0,36% dos valores de pressão 1% e 0,46% superiores aos valores de pressão 0,1%;

b) os valores de  $\sigma_{\text{mod}}$  são negativos para (figura 48):

$$A_M \leq 66 \text{ para pressão média;}$$

$A_M \leq 77$  para pressão 1%;  
 $A_M \leq 84$  para pressão 0,1%.

Figura 48 – Detalhe dos valores de  $\sigma_{mod}$  em função do parâmetro  $A_M$  para o teto do conduto



(fonte: elaborada pela autora)

## 6.5 ESTIMATIVA DE DANOS À ESTRUTURA EM FUNÇÃO DA OCORRÊNCIA DE PRESSÕES MÍNIMAS

Os estudos acerca deste tema utilizam, geralmente, a transposição de valores médios de pressão, entretanto a tendência atual é de se considerar as pressões em função da probabilidade de ocorrência, uma vez que os efeitos da erosão ou cavitação são acumulativos, ou seja, existem condições de operação que são desfavoráveis num intervalo de tempo e não em todo o tempo. Como já foi explanado anteriormente, o uso das probabilidades são mais confiáveis uma vez que determinam uma área de probabilidades, diferentemente dos valores mínimos absolutos que não seriam representativos para o tamanho da amostra.

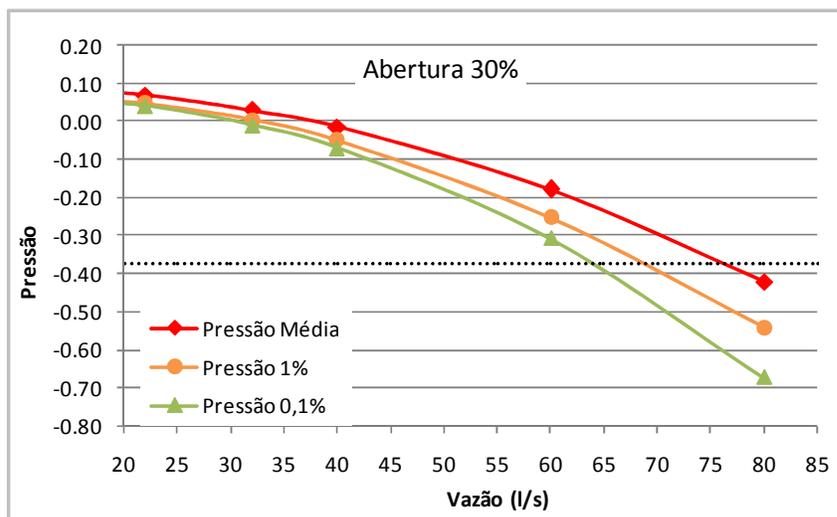
Na análise feita procurou-se definir uma relação de  $\sigma$  (índice de cavitação) em função da abertura da comporta, e estabelecer diferentes regiões a partir das quais começariam a aparecer danos à estrutura. Para essa análise considerou-se o valor da pressão mínima que ocorre a jusante da comporta.

Em estruturas hidráulicas recomenda-se considerar que o concreto resiste à tração máxima de -6 mca. (PORTUGAL, 1975)<sup>5</sup>. Em função disto, fixou-se o seguinte critério de níveis de danos:

- para pressões  $P_{\text{média}} < -6$  mca, tem-se a zona de pressões na qual o concreto estará sujeito a esforços, que podem causar danos a estrutura, durante a maior parte do tempo – situação de bloqueio;
- para pressões  $P_{1\%} < -6$  mca, o conduto estará sujeito a esforços, que podem causar danos, durante um curto intervalo de tempo – situação crítica;
- para pressões  $P_{0,1\%} < -6$  mca, o conduto estará sujeito a esforços, que podem causar danos, durante um intervalo de tempo muito pequeno – situação incipiente.

De modo a avaliar os valores dos índices de cavitação problemáticos, ou seja, valores que possam indicar condições em que ocorrerão possíveis danos à estrutura, foram analisadas quais as vazões que causavam pressões negativas para cada uma das porcentagens de abertura da comporta, como neste caso, quer-se os valores de pressão equivalentes a -6 mca procurou-se o valor de -0,375 mca que é a pressão correspondente em modelo, considerando que a estrutura no laboratório estaria na escala 1:16. A figura 49 exemplifica como isto foi efetuado.

Figura 49 – Comportamento das pressões em função da vazão



(fonte: elaborada pela autora)

A partir de figuras como a apresentada, obtiveram-se os valores de vazão que causam a pressão limite de resistência do concreto. A vazão permitiu conhecer a velocidade do fluxo

<sup>5</sup> Com relação ao valor de tração máxima pode-se, ainda, citar Portugal (1981) e Sentürk (1994).

por meio da equação da continuidade e assim calcular o valor de  $\sigma$  (fórmula 2). O quadro 4 apresenta os valores do índice de cavitação, a abertura crítica e o valor de  $A_M$  para a pressão de -6 mca (-0,375 mca em modelo). Destaca-se, ainda, que o valor da pressão de vapor da água foi considerado 0,33 mca e a pressão atmosférica 10,33 mca.

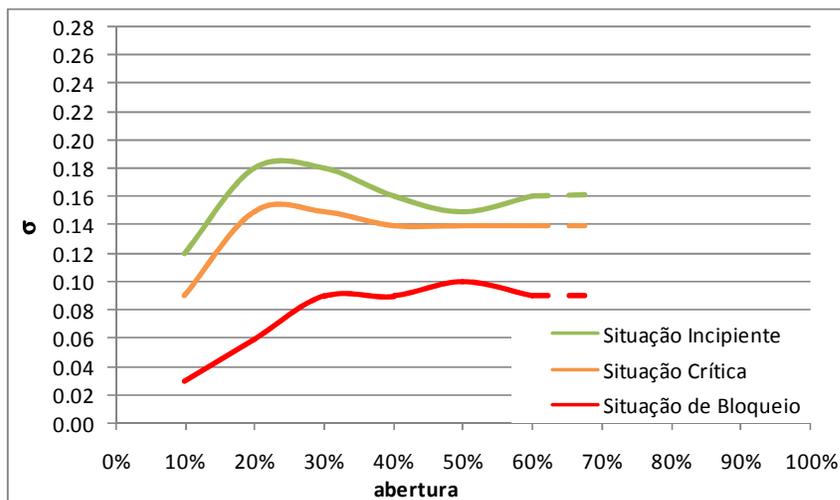
Quadro 4 – Índices de cavitação considerando pressão igual a -6 m.c.a. (-0,375 m.c.a em modelo) para as diferentes probabilidades de ocorrência

TETO						
abertura	Média		P1%		P0,1%	
	$\sigma$	$A_M$	$\sigma$	$A_M$	$\sigma$	$A_M$
10%	0.06	3.26	0.08	3.67	0.09	3.96
20%	0.11	6.18	0.14	6.82	0.16	7.39
30%	0.14	8.50	0.18	9.39	0.21	10.16
40%	0.16	10.28	0.20	11.48	0.23	12.31
50%	0.17	11.95	0.21	13.32	0.25	14.40
60%	0.17	13.05	0.22	14.77	0.26	16.06
BASE						
abertura	Média		P1%		P0,1%	
	$\sigma$	$A_M$	$\sigma$	$A_M$	$\sigma$	$A_M$
10%	0.03	2.30	0.09	3.97	0.12	4.49
20%	0.06	4.63	0.15	7.05	0.18	7.87
30%	0.09	6.55	0.15	8.75	0.18	9.64
40%	0.09	7.97	0.14	9.67	0.16	10.22
50%	0.10	9.06	0.14	10.89	0.15	11.34
60%	0.09	9.53	0.14	11.90	0.16	12.50

(fonte: elaborada pela autora)

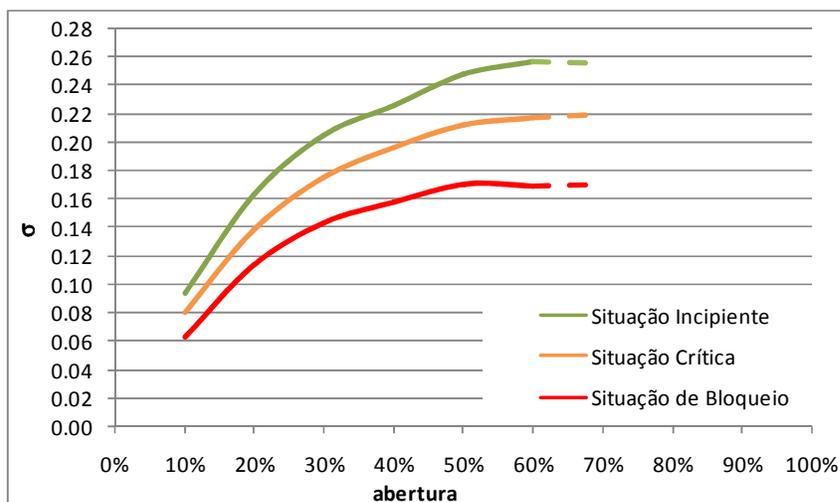
Com os dados obtidos do quadro 4 puderam, então, ser inferidas as curvas que determinam os níveis de danos aos quais a estrutura fica vulnerável. As figuras 50 e 51 apresentam as curvas para a base e para o teto, respectivamente.

Figura 50 – Curvas para os diferentes níveis de danos que a base do conduto está sujeita



(fonte: elaborada pela autora)

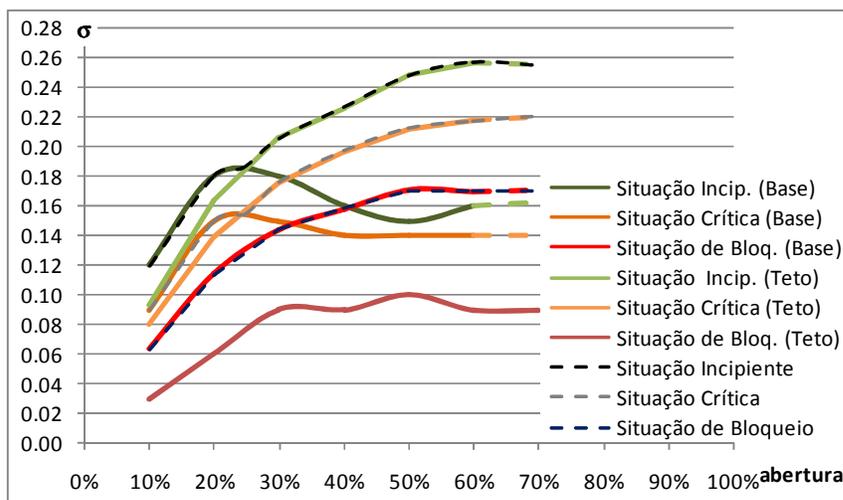
Figura 51 – Curvas para os diferentes níveis de danos que o teto do conduto está sujeito



(fonte: elaborada pela autora)

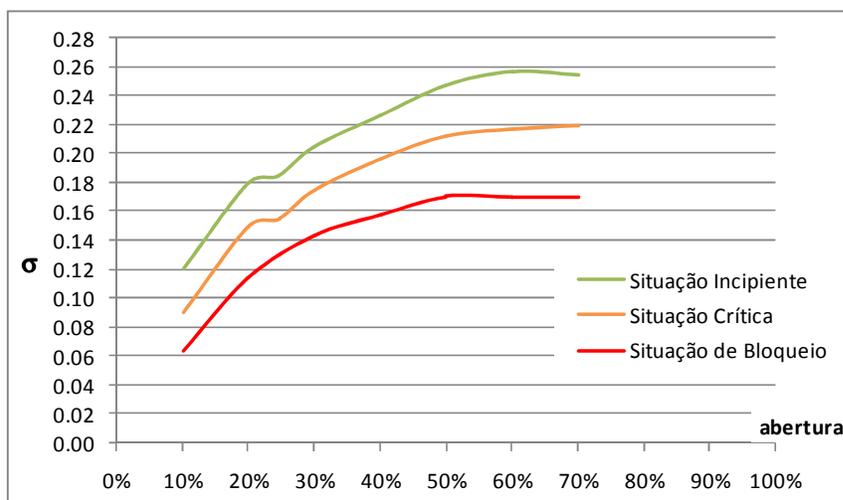
Com as curvas do índice de cavitação para a base e para o teto foram montadas as curvas finais, figura 52, utilizando o ponto mais crítico (base ou teto) para cada abertura, dessa forma obtiveram-se as curvas envoltórias dos limites de cada situação, figura 52. Na figura 53 estão apresentadas as curvas finais tanto para base como para o teto do conduto.

Figura 52 – Envolvórias



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 53 – Envolvórias finais para os níveis de danos

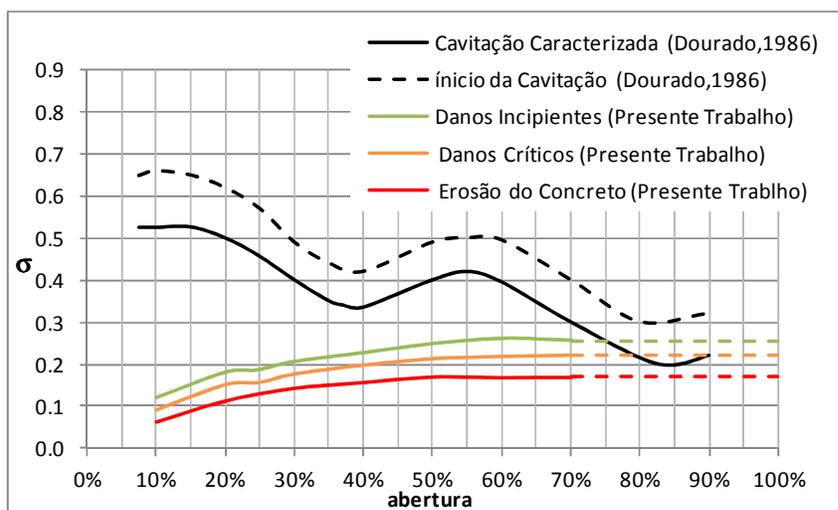


(fonte: elaborada pela autora)

Portanto, a área abaixo da curva de situação incipiente indica que a estrutura sofrerá com esforços por um curto intervalo de tempo, sendo assim os efeitos serão percebidos muito tempo depois de terem ocorrido. Já a área abaixo da curva de limite de situação crítica indica que os esforços aos quais a estrutura deverá resistir serão aplicados durante um intervalo de tempo maior. A área abaixo da curva de situação de bloqueio indica que os esforços de desgaste afetarão a estrutura na maior parte do tempo de operação da eclusa. Neste caso os danos serão notados mais rapidamente devido à agressividade do processo.

Na figura 54, são apresentadas as curvas obtidas neste trabalho com as sugeridas por Dourado (1986) para comportas tipo vagão. Através desta podem ser percebidas as diferenças de resultados entre uma comporta e outra, logo, em primeira instância, pode ser inferido que a comporta tipo segmento invertida contribui para minimizar os esforços causados pelas flutuações de pressão a jusante da obstrução do conduto.

Figura 54 – Comparação dos valores de  $\sigma$ , para comportas tipo segmento invertida, com os valores de  $\sigma$  para comportas tipo vagão.



(fonte: elaborada pela autora)

No quadro 5 identifica-se que os valores do índice de cavitação ( $\sigma$ ) obtidos neste trabalho estão dentro da faixa mostrada na tabela apresentada por Khatsuria (2005).

Quadro 5 – Valores de  $\sigma$  (índice de cavitação) para que se dê início aos danos

Estrutura ou tipo de Irregularidade	$\sigma$	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	
triângular ( <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	-

(fonte: adaptado de KHATSURIA, 2005)

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho propõe a identificação de condições de operação nas quais possam ocorrer pressões negativas a jusante de comportas tipo segmento invertida, bem como em que circunstâncias podem ocorrer danos à estrutura. Dentro desta sistemática, classificou-se o risco de erosão no concreto por pressões negativas (tração) em função do tempo de permanência das pressões inferiores a  $-6$  mca (tração), ou seja:

- situação incipiente: ocorrência de 0,1% do tempo de pressões menores ou iguais que  $-6$  mca;
- situação crítica: ocorrência de 1% do tempo de pressões menores ou iguais que  $-6$  mca;
- situação de bloqueio: ocasião onde a pressão menor ou igual a  $-6$  mca foi registrada na metade do tempo.

Faz parte do escopo do trabalho, também, a análise do comportamento das pressões e a posterior definição de critérios para previsão de pressões mínimas. Pela análise efetuada a partir de dados obtidos em modelos hidráulicos de laboratório, foi possível concluir:

a) quanto ao comportamento das pressões:

- as pressões possuem comportamento semelhante na distribuição longitudinal independente da probabilidade de ocorrência (Pressão média,  $P_{1\%}$  e  $P_{0,1\%}$ );
- as menores pressões ocorrem logo a jusante da comporta e a medida que o ponto de medição se afasta da comporta percebe-se que as pressões aumentam até se estabilizar num valor que depende da vazão, ou seja, pode-se definir uma zona crítica em que serão mais frequentes os danos e necessidades de reparos;
- no início da abertura da comporta é na base do conduto que são registradas as menores pressões, depois de determinada abertura ( $\sim 22\%$ , figura 52) os valores mínimos passam a ser registrados no teto. Através do conhecimento destas aberturas críticas podem-se definir leis de abertura de comporta para se reduzir o tempo mantido em situações não favoráveis;
- para uma mesma vazão ( $Q$ ), as menores porcentagens de abertura ( $a/D$ ) ocasionam as menores pressões na base e no teto, ou seja, as maiores probabilidades de ocorrência de danos estão associadas as menores aberturas da comporta;
- na média, as menores pressões ocorrem no teto do conduto.

- b) quanto aos valores dos índices de cavitação/coeficientes de pressão mínimos que ocorrem a jusante da comporta ( $\sigma_{mod}$ ):
- passam a ser negativos, na base do conduto, quando o parâmetro  $A_M$  for inferior a 23 para pressão média;
  - for inferior a 27,5 para pressão com probabilidade de 1% de ser superada;
  - for inferior a 33 para pressão com probabilidade de 0,1% de ser superada;
  - passam a ser negativos, no teto do conduto, quando o parâmetro  $A_M$  for inferior a 41 para pressão média;
  - for inferior a 51 para pressão com probabilidade de 1% de ser superada;
  - for inferior a 64 para pressão com probabilidade de 0,1% de ser superada.

A comparação dos valores do parâmetro  $A_M$ , entre base e teto, mostra que as pressões no teto tendem a ser negativas com vazões menores que as que ocorrem na base ( $A_M$  maiores). Os gráficos das figuras 41 a 43 (base) e 45 a 47 (teto) permitem estimar as pressões mínimas que podem ocorrer para diferentes condições de escoamento. Através dos ensaios é possível concluir quanto às zonas de possíveis danos:

- c) que até a abertura de, aproximadamente, 22% é na base do conduto que ocorrem danos incipientes e críticos após esta abertura o teto do conduto é a região mais suscetível as consequências das pressões mínimas. No que diz respeito à erodibilidade da superfície do concreto, a região mais suscetível ao fenômeno é o teto do conduto, independente da porcentagem de abertura, ou seja, se houver erosão do concreto na base, certamente já houve erosão da superfície do concreto no teto do conduto.

Espera-se com este estudo contribuir para a compreensão do comportamento do escoamento e para o dimensionamento de estruturas mais seguras. Entretanto, muito ainda tem-se a esclarecer e ampliar as conclusões. Para isto recomenda-se em estudos futuros:

- a) ensaiar faixas de vazão e cargas mais amplas;
- b) analisar parâmetros estatísticos de assimetria, curtose visando encontrar leis de distribuição que possam permitir reproduzir as distribuições estatísticas das pressões provenientes do escoamento;
- c) analisar as frequências dominantes de fenômenos oscilatórios;
- d) correlacionar as pressões entre pontos distintos.

## REFERÊNCIAS

- BATTISTON, C. C.; SCHETTINI, E. B. C.; CANELLAS, A. V. B.; MARQUES, M. G. Eclusas de Navegação: caracterização hidráulica do escoamento a jusante das válvulas de enchimento/esvaziamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2009. 1 CD-ROM.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. : **Eletobrás. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Cap. 3. p. 47. 2003. Disponível em: <[http://www.google.com.br/#sclient=psy-ab&hl=pt-BR&source=hp&q=crit%C3%A9rios%20de%20projeto%20civil%20de%20usinas%20hidrel%C3%A9tricas&pbx=1&oq=&aq=&aqi=&aql=&gs\\_sm=&gs\\_upl=&bav=on.2,or.r\\_gc.r\\_pw.,cf.osb&fp=98f685d8fe7779a0&biw=1280&bih=685&pf=p&pdl=500](http://www.google.com.br/#sclient=psy-ab&hl=pt-BR&source=hp&q=crit%C3%A9rios%20de%20projeto%20civil%20de%20usinas%20hidrel%C3%A9tricas&pbx=1&oq=&aq=&aqi=&aql=&gs_sm=&gs_upl=&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.,cf.osb&fp=98f685d8fe7779a0&biw=1280&bih=685&pf=p&pdl=500)>. Acesso em 6 out. 2011.
- BRAZ, A. Eclusas, o fim de uma longa espera. Marabá, 2010. Disponível em: <<http://quaradouro.blogspot.com/2010/11/eclusas-o-fim-de-uma-longa-espera.html>>. Acesso em: 30 abr. 2011.
- COELHO, W. R. **Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga**. 2006. 234 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Julho de Mesquita Filho, Ilha Solteira.
- DOURADO, C. L. **Aplicações e uso da medição de pressões em modelos de eclusas de navegação**. 1986. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ESTÂNCIA TURÍSTICA DE BARRA BONITA – SP. **Pontos Turísticos**. Eclusa. Disponível em: <[http://www.barrabonita.sp.gov.br/portal1/municipio/ponto\\_turistico.asp?iIdMun=100135060](http://www.barrabonita.sp.gov.br/portal1/municipio/ponto_turistico.asp?iIdMun=100135060)>. Acesso em: 4 jun. 2011.
- GIKAS, I. Critérios de semelhança para estudos de cavitação em modelos. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 181-235, 1982.
- GONTIJO, N. T.; CAMPOS, R. G. D. **Estruturas Hidráulicas Seminário: eclusas**. 2005. 29 f. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- KHATSURIA, R. M. **Hdraulics of Spillways and Energy Dissipators**. 3rd. New York.: Marcel Dekker. 2005.
- MOVIMENTO DE SOLIDARIEDADE ÍBERO-AMERICANA. **Hidroviias e eclusas na pauta de MT**. Disponível em: <<http://blogdoambientalismo.com/hidroviias-e-eclusas-na-pauta-de-mt/>>. Acesso em: 12 maio 2011.

PORTUGAL. Ministério do Equipamento Social e do Meio Ambiente – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. **Directivas para a colocação das comportas nos descarregadores das barragens**. Memória n. 469. Lisboa, 1975.

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

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

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

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

TIPOS de comportas. Disponível em:

<<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/comportas2.htm>>. Acesso em: 13 ago. 2011.

TULLIS, J. P. **Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação: cavitação em sistemas hidráulicos**. São Paulo, Centro Tecnológico de Hidráulica, 1982. p. 1.1-8.5.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of the Army. Corpo of Engineers. Office of the Chief of Engineers. **EM 1110-2-1610: engineering and design – hydraulic design of lock culvert valves**. Washington, DC, 1975 Disponível em:

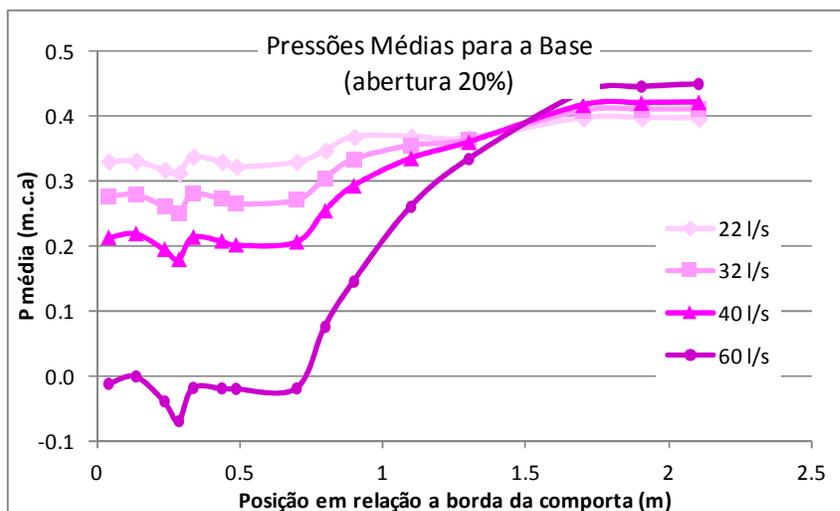
<<http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1610/toc.htm>> Acesso em: 27 maio 2011.

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

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

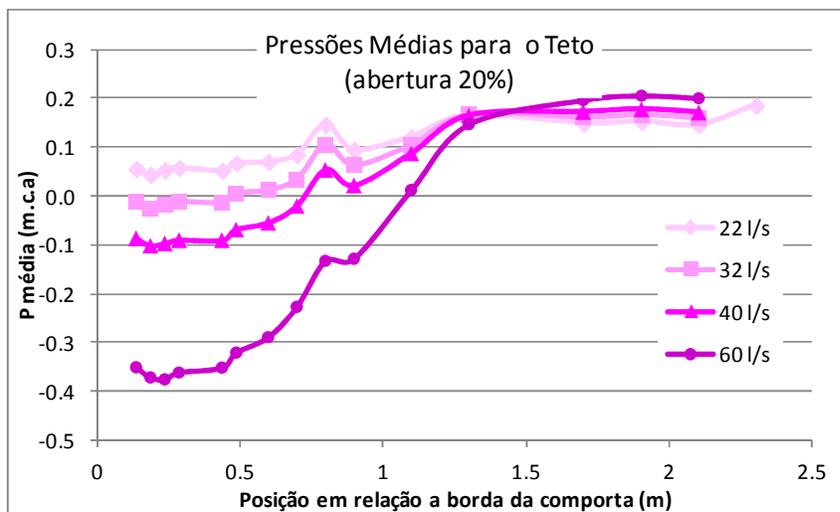
**APÊNDICE A – Comportamento das pressões médias,  
mínimas e mínimas extremas**

Figura I – Comportamento das pressões médias na base, abertura de 20%



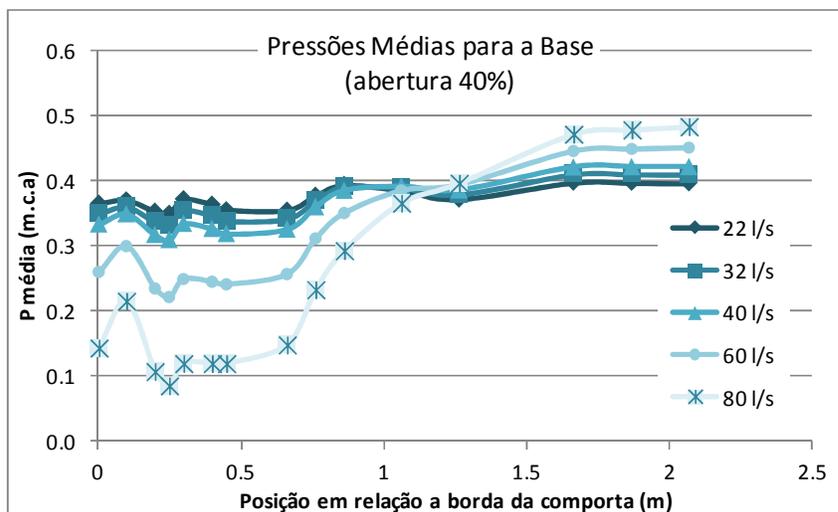
(fonte: elaborada pela autora)

Figura II – Comportamento das pressões médias no teto, abertura de 20%



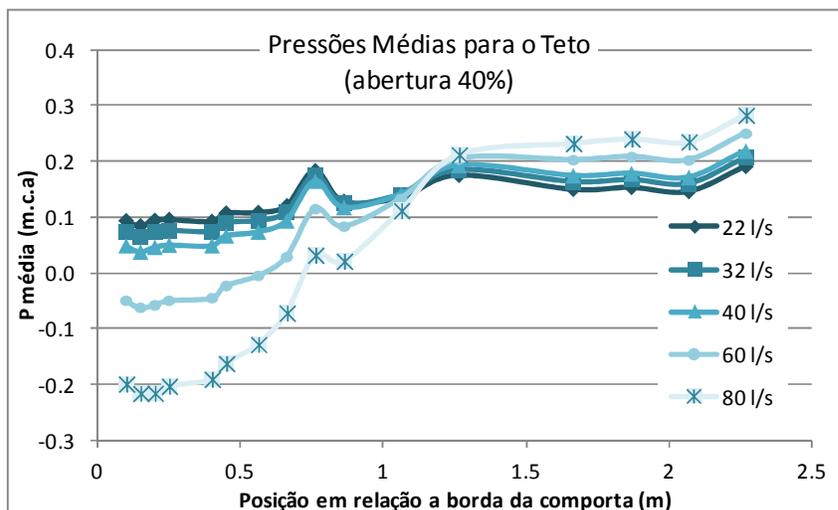
(fonte: elaborada pela autora)

Figura III – Comportamento das pressões médias na base, abertura de 40%



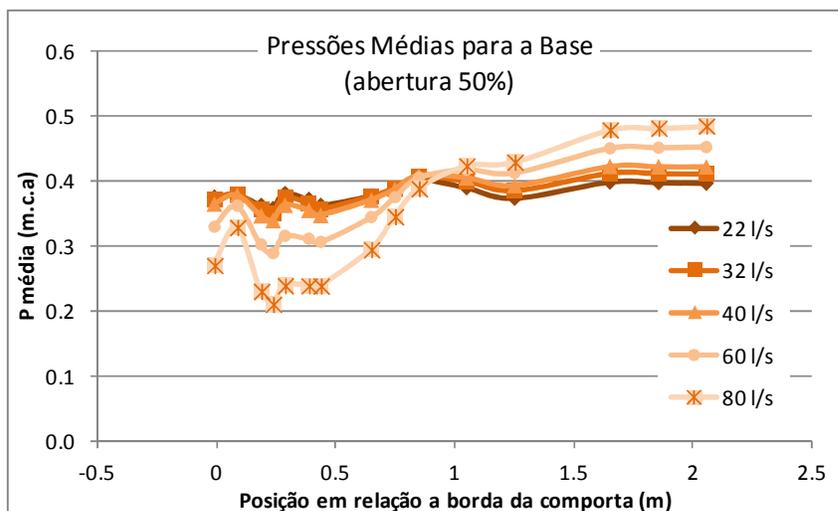
(fonte: elaborada pela autora)

Figura IV – Comportamento das pressões médias no teto, abertura de 40%



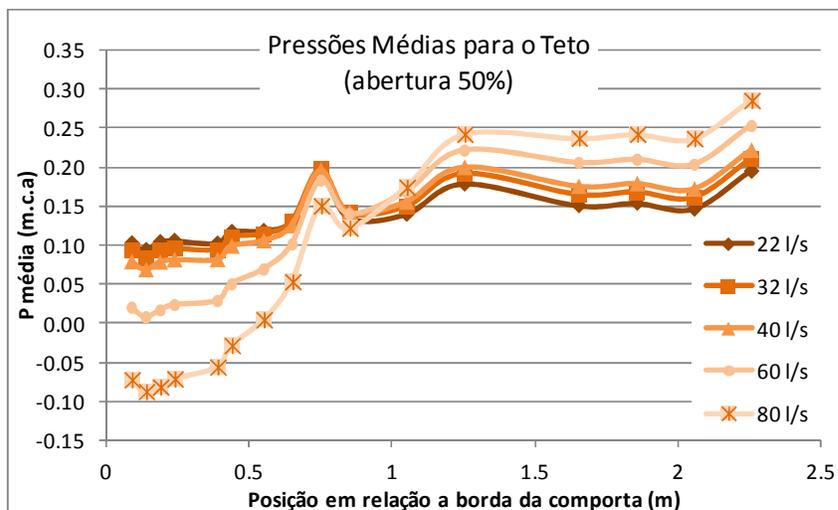
(fonte: elaborada pela autora)

Figura V – Comportamento das pressões médias na base, abertura de 50%



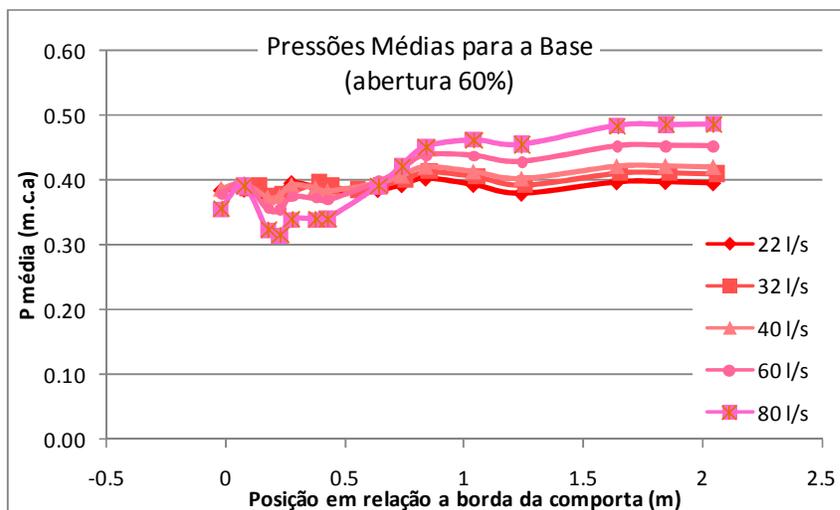
(fonte: elaborada pela autora)

Figura VI – Comportamento das pressões médias no teto, abertura de 50%



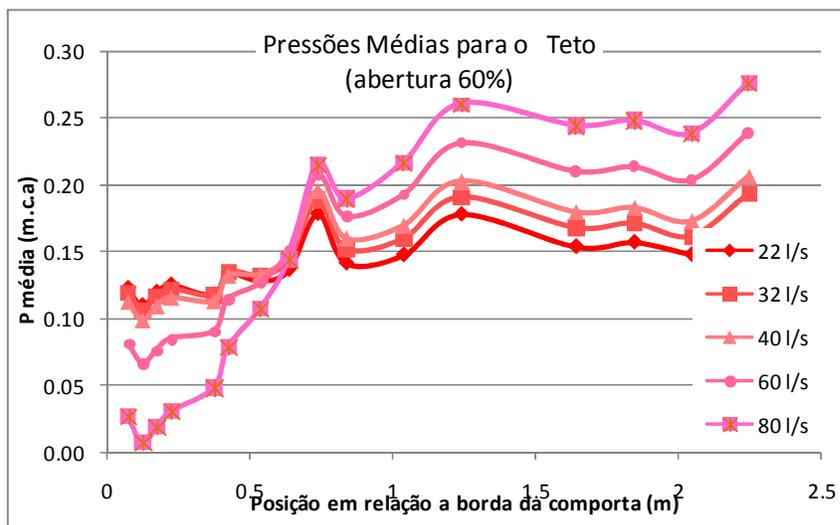
(fonte: elaborada pela autora)

Figura VII – Comportamento das pressões médias na base, abertura de 60%



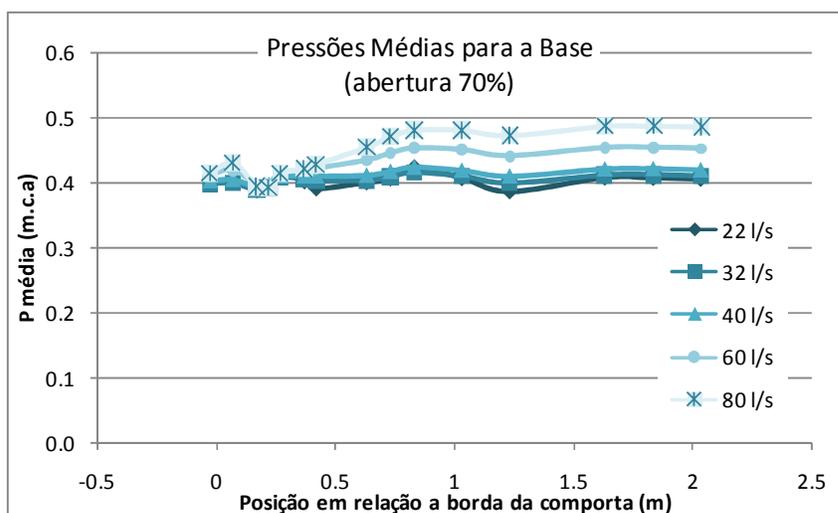
(fonte: elaborada pela autora)

Figura VIII – Comportamento das pressões médias no teto, abertura de 60%



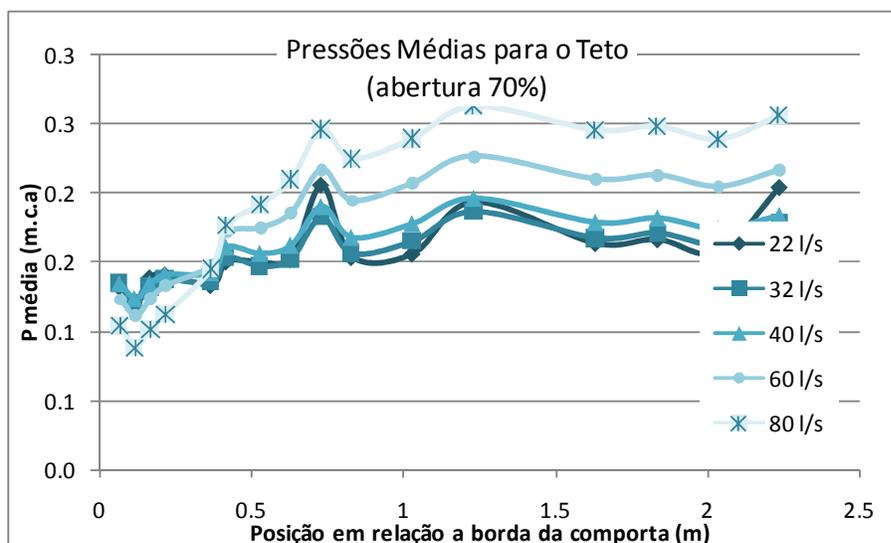
(fonte: elaborada pela autora)

Figura IX – Comportamento das pressões médias na base, abertura de 70%



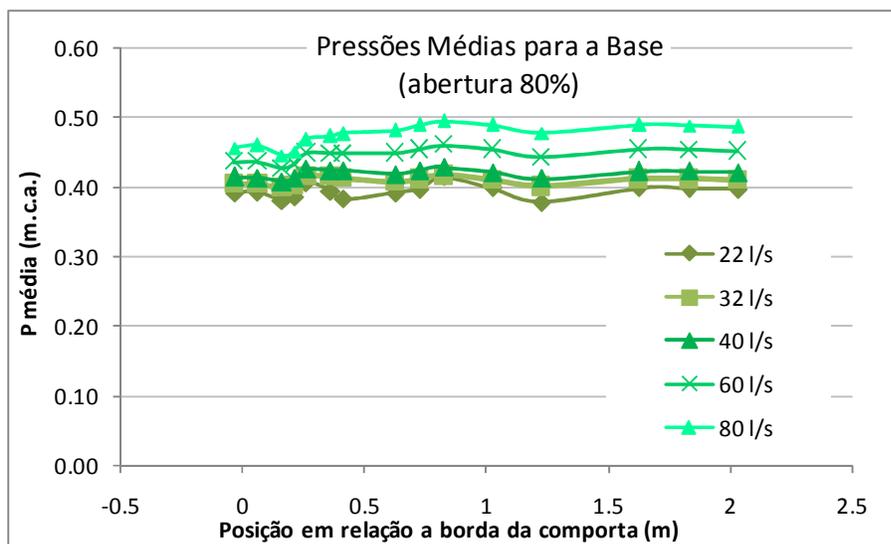
(fonte: elaborada pela autora)

Figura X – Comportamento das pressões médias no teto, abertura de 70%



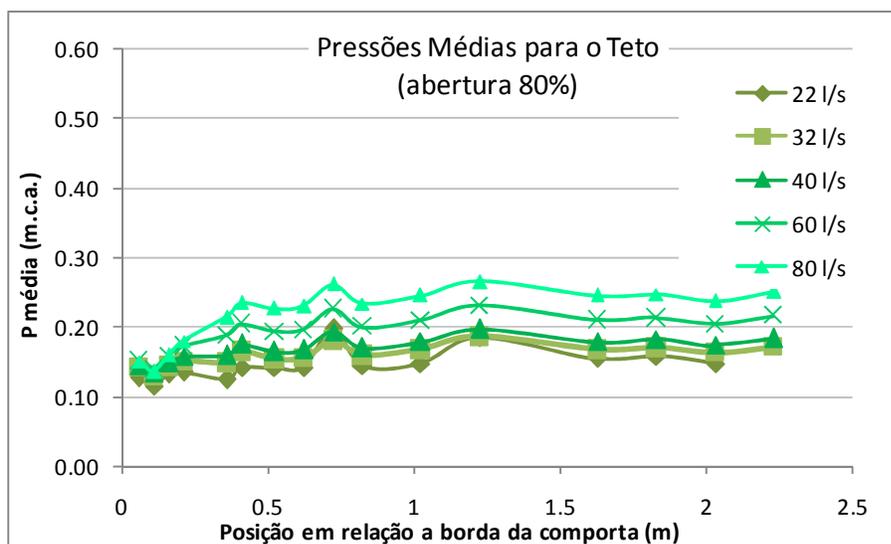
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XI – Comportamento das pressões médias na base, abertura de 80%



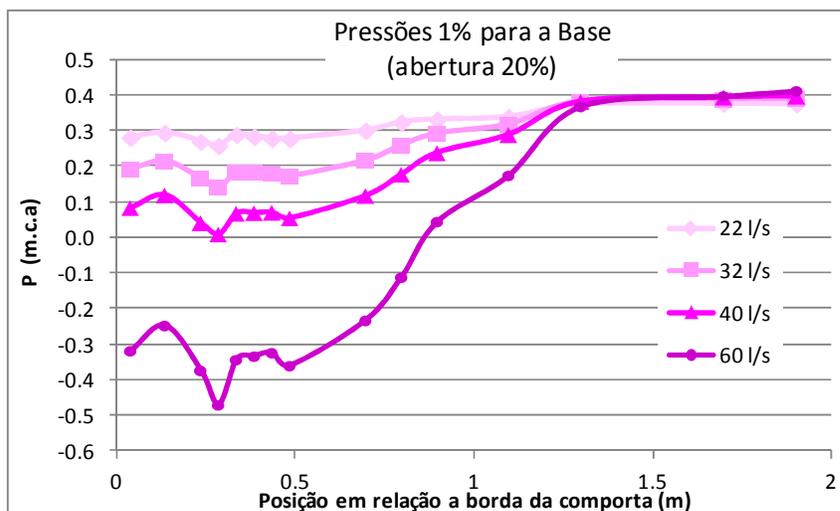
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XII – Comportamento das pressões médias no teto, abertura de 80%



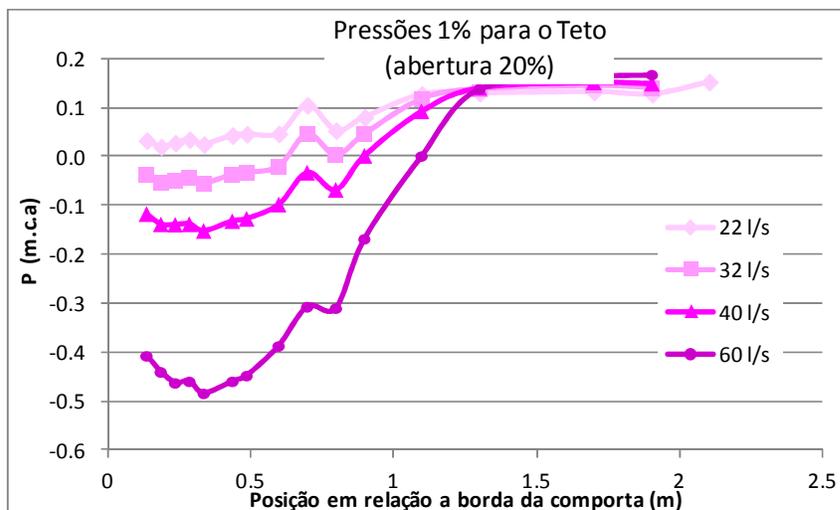
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XIII – Comportamento das pressões 1% na base, abertura de 20%



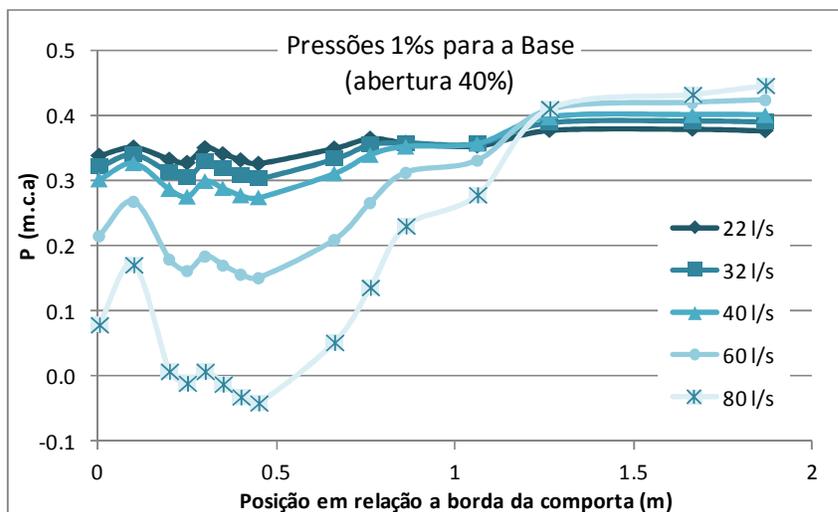
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XIV – Comportamento das pressões 1% no teto, abertura de 20%



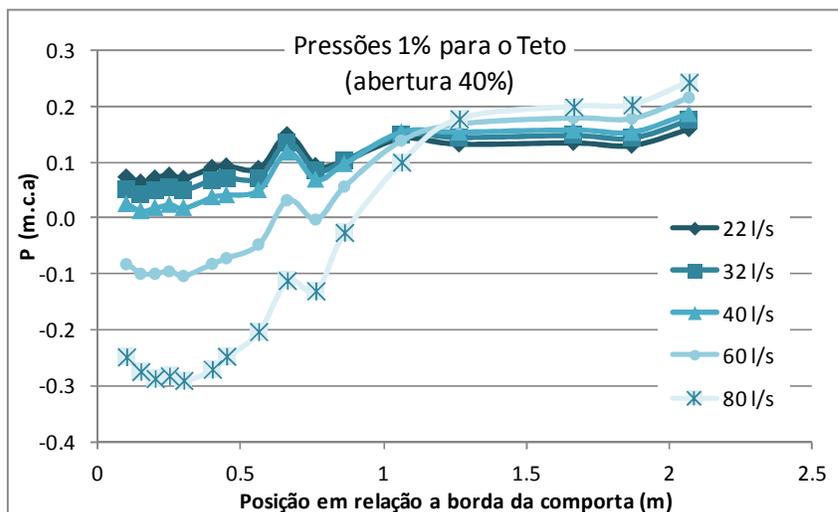
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XV – Comportamento das pressões 1% na base, abertura de 40%



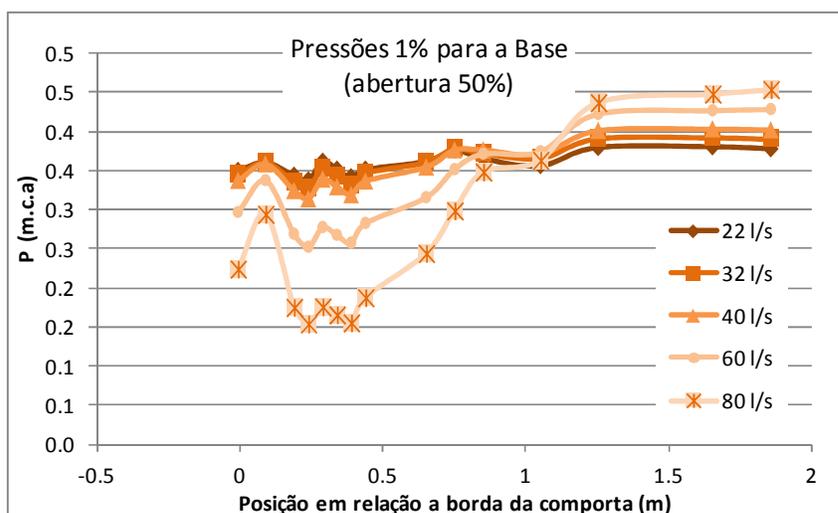
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XVI – Comportamento das pressões 1% no teto, abertura de 40%



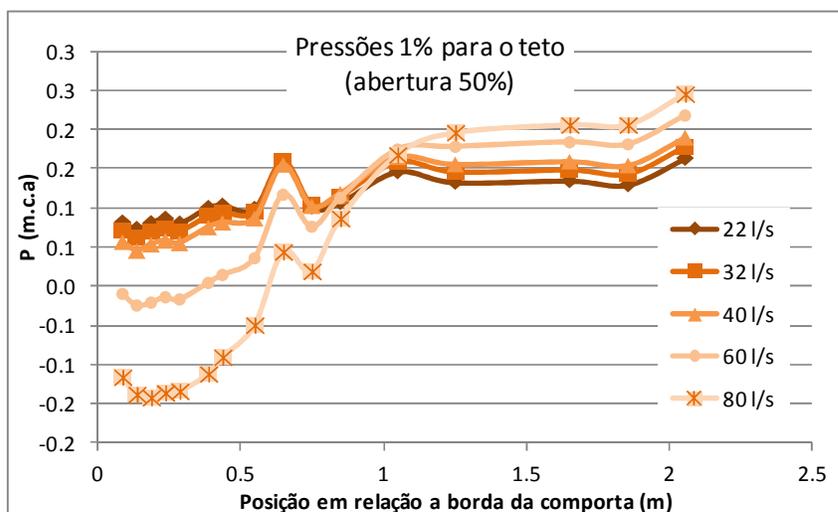
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XVII – Comportamento das pressões 1% na base, abertura de 50%



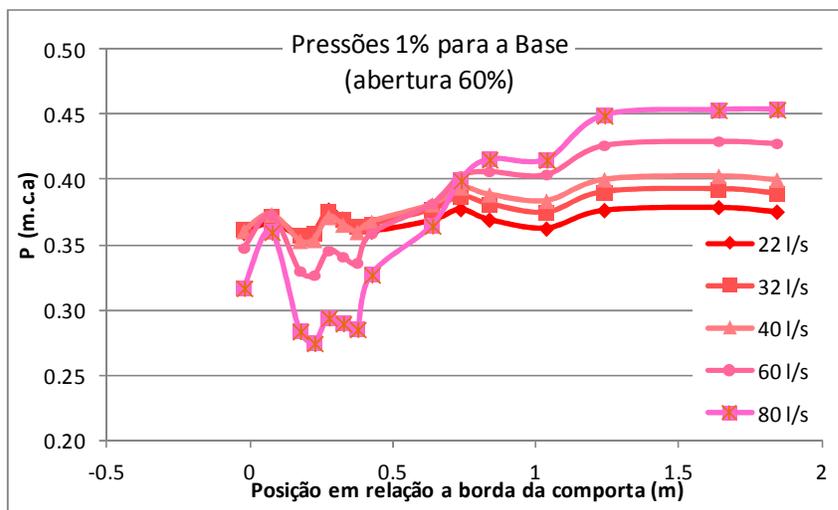
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XVIII – Comportamento das pressões 1% no teto, abertura de 50%



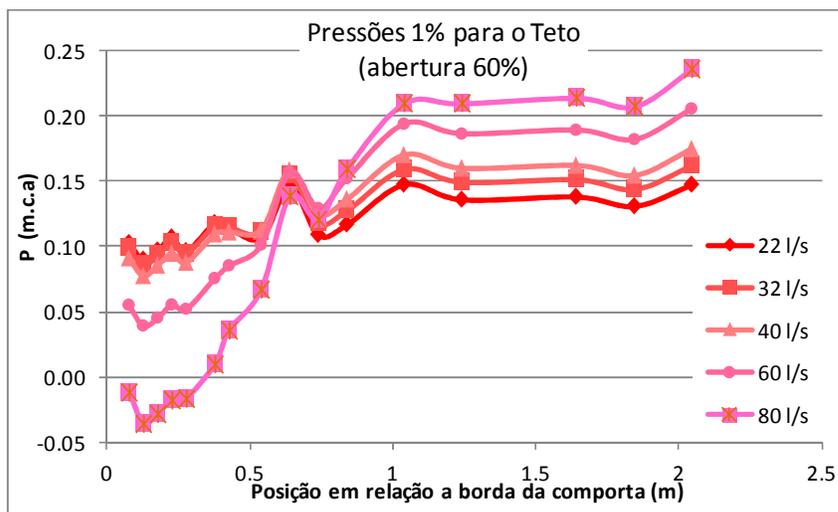
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XIX – Comportamento das pressões 1% na base, abertura de 60%



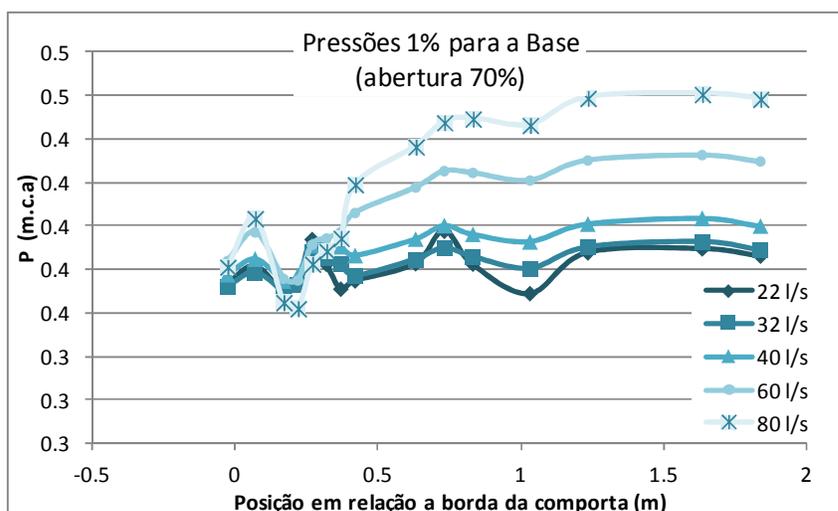
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XX – Comportamento das pressões 1% no teto, abertura de 60%



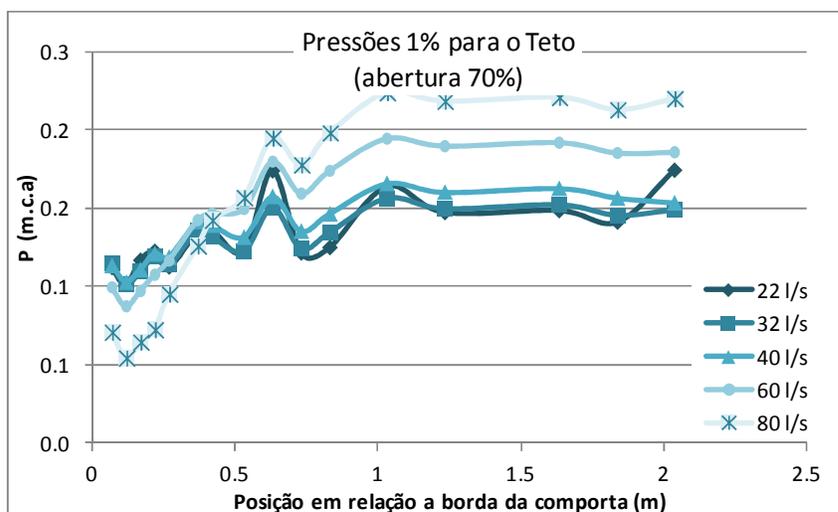
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXI – Comportamento das pressões 1% na base, abertura de 70%



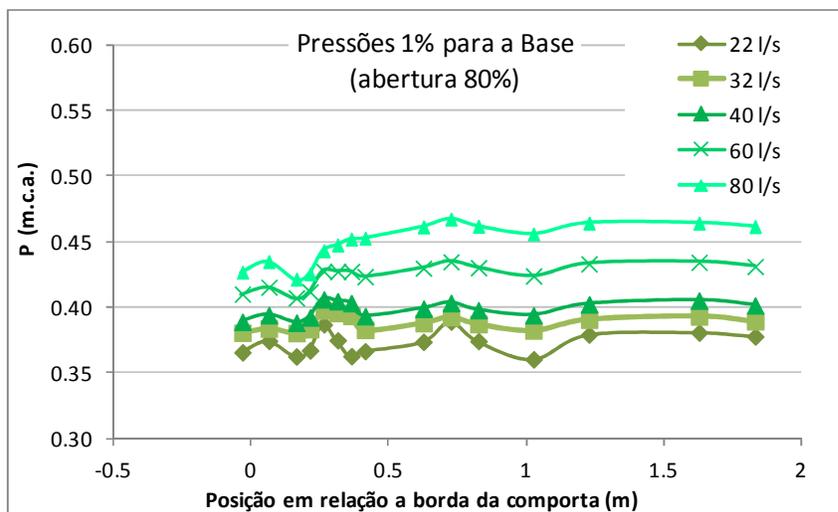
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXII – Comportamento das pressões 1% no teto, abertura de 70%



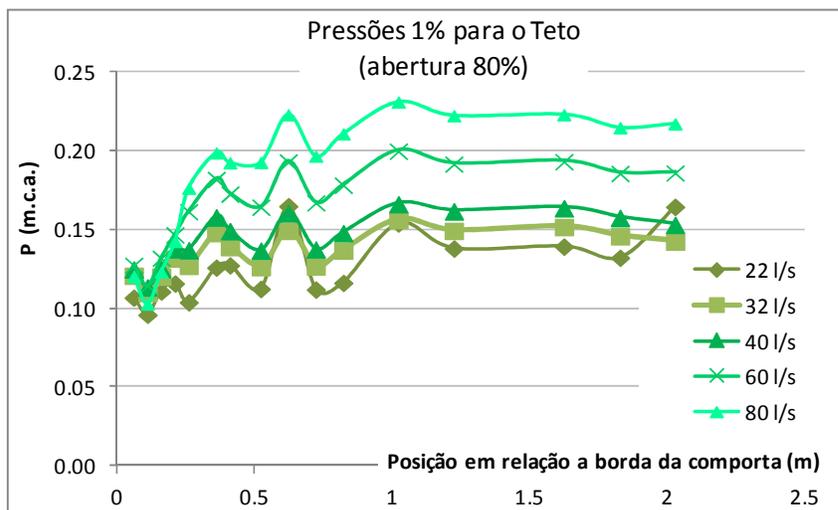
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXIII – Comportamento das pressões 1% na base, abertura de 80%



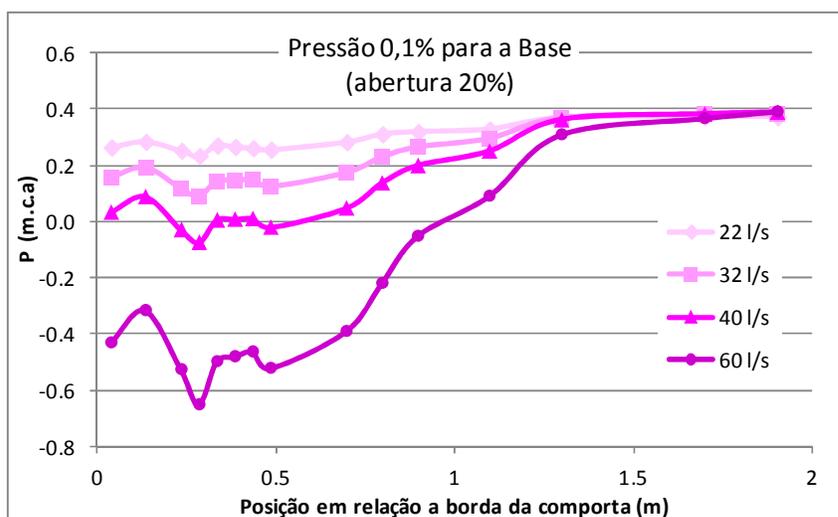
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXIV – Comportamento das pressões 1% no teto, abertura de 80%



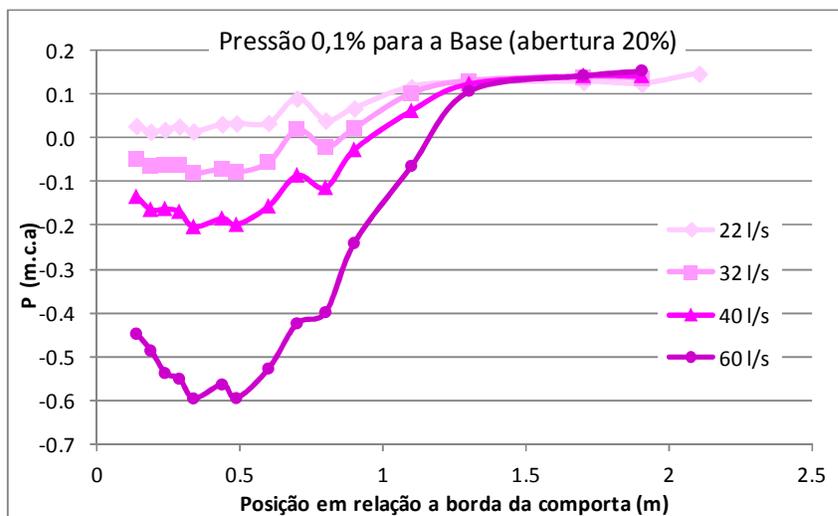
(fonte: elaborada pela autora do trabalho)

Figura XXVI – Comportamento das pressões 0,1% na base, abertura de 20%



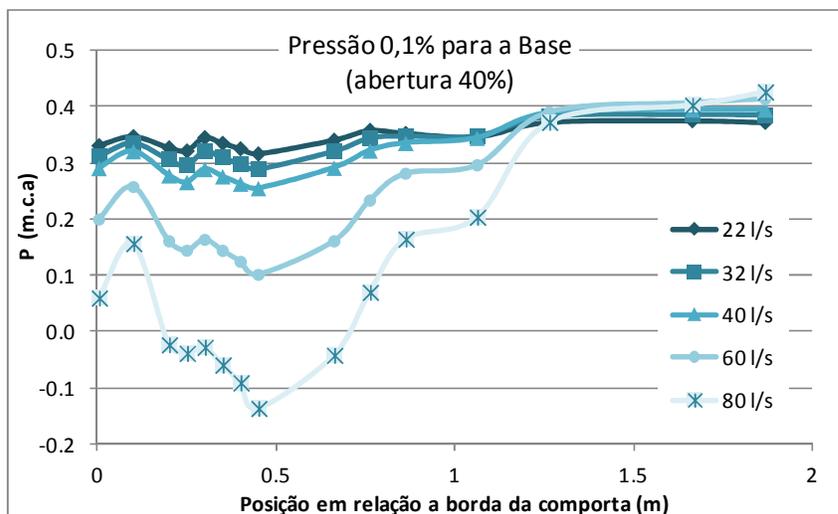
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXVII – Comportamento das pressões 0,1% no teto, abertura de 20%



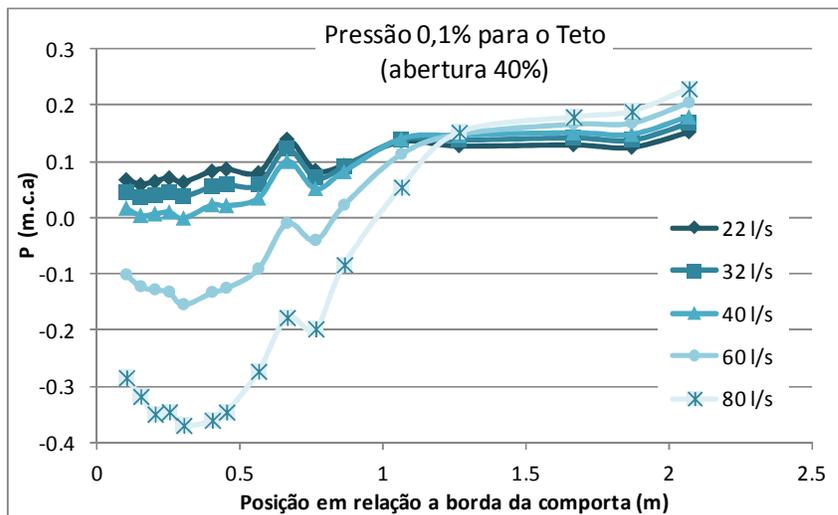
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXVIII – Comportamento das pressões 0,1% na base, abertura de 40%



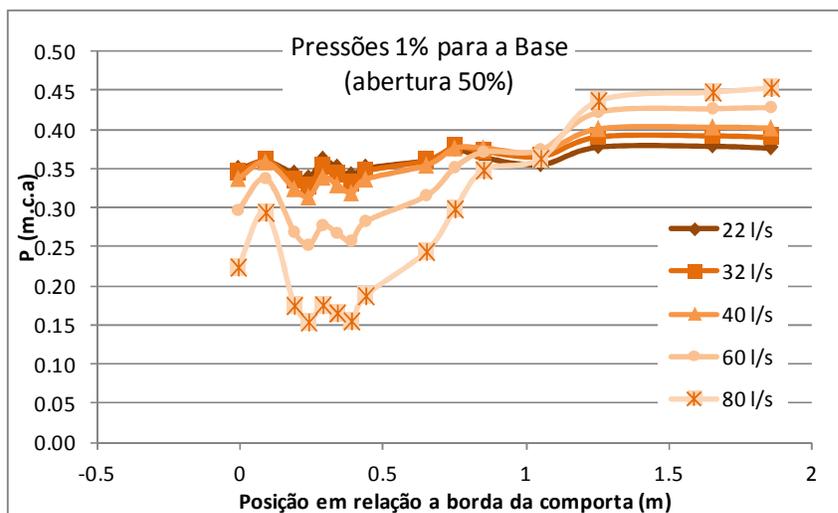
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXIX – Comportamento das pressões 0,1% no teto, abertura de 40%



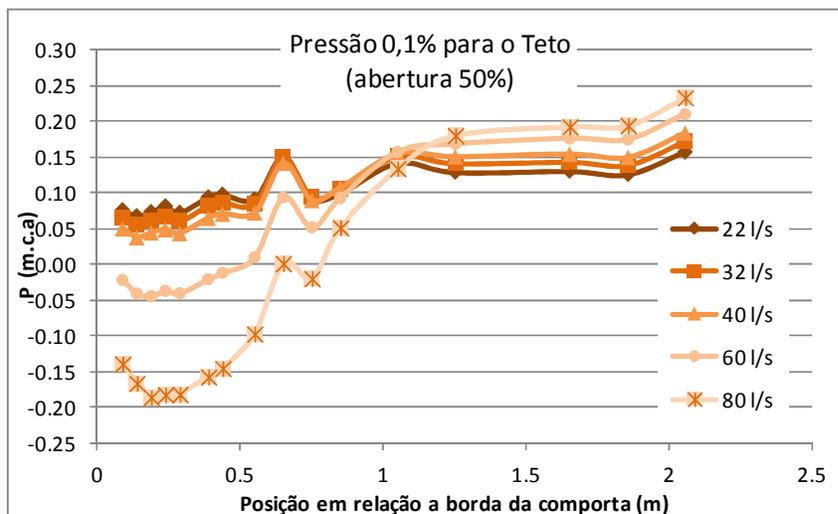
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXX – Comportamento das pressões 0,1% na base, abertura de 50%



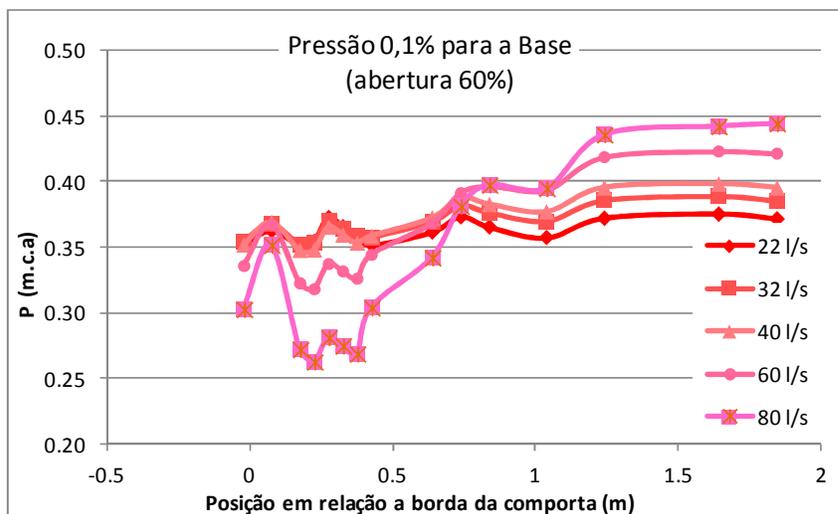
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXXI – Comportamento das pressões 0,1% no teto, abertura de 50%



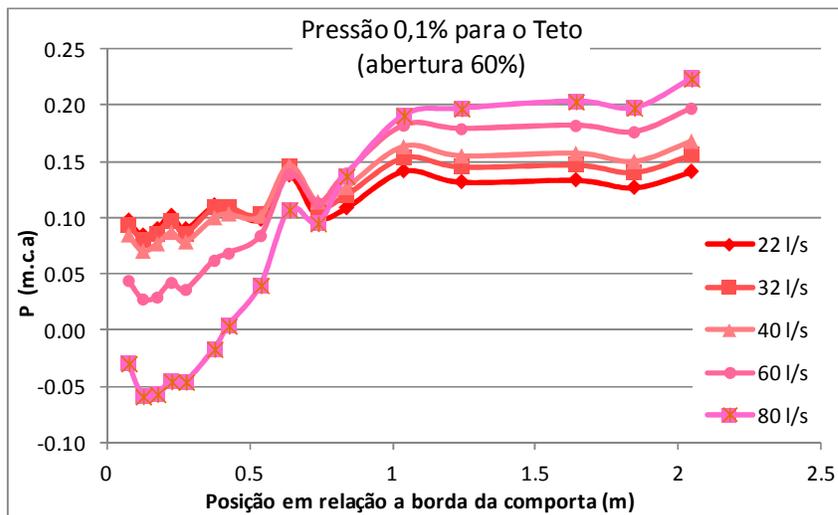
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXXII – Comportamento das pressões 0,1% na base, abertura de 60%



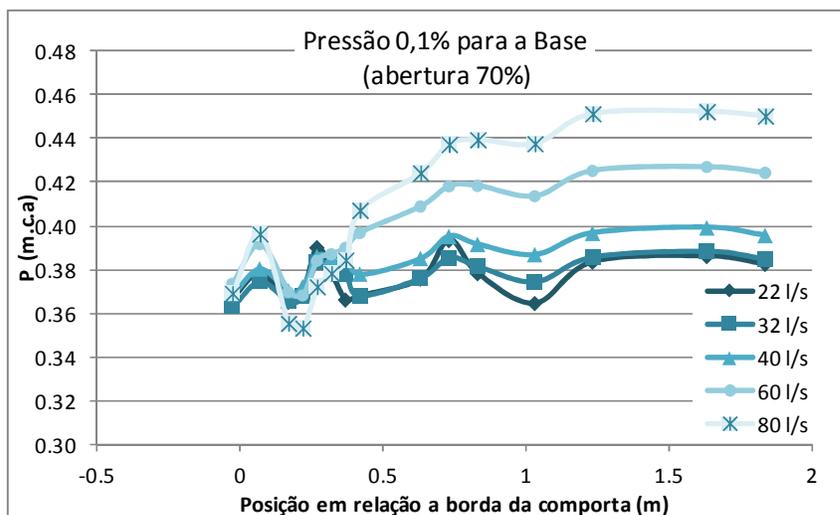
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXXIII – Comportamento das pressões 0,1% no teto, abertura de 60%



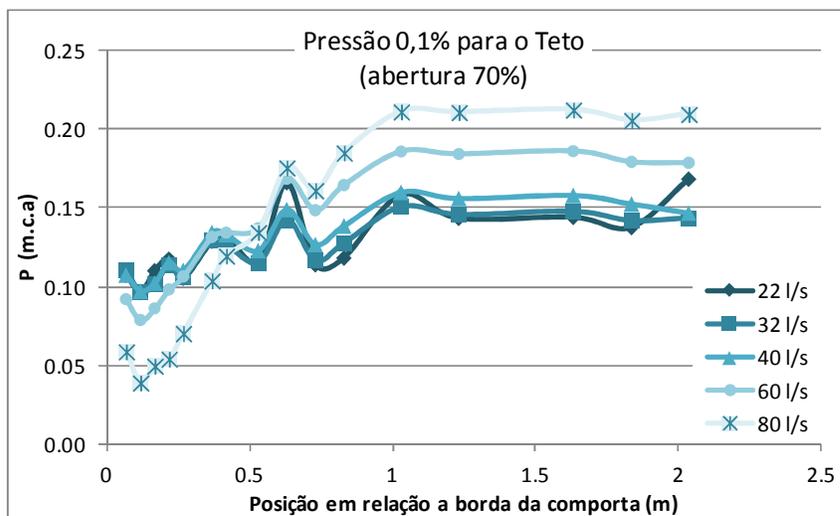
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXXIV – Comportamento das pressões 0,1% na base, abertura de 70%



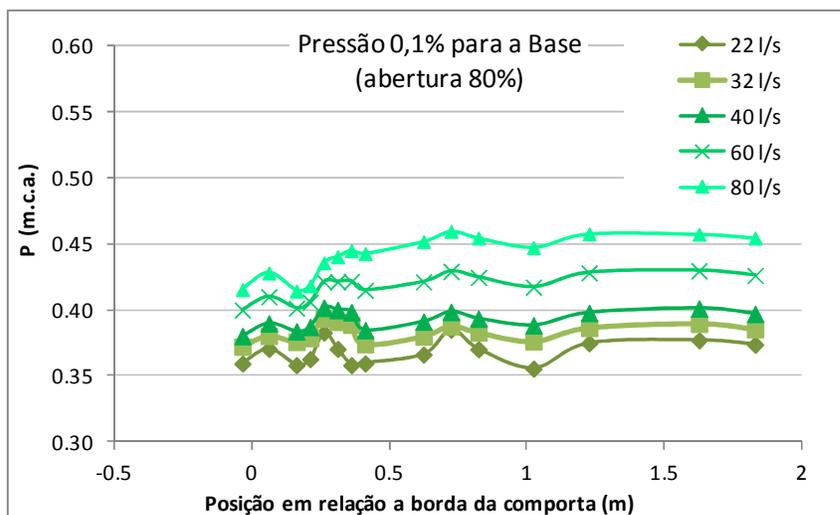
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXXV – Comportamento das pressões 0,1% no teto, abertura de 70%



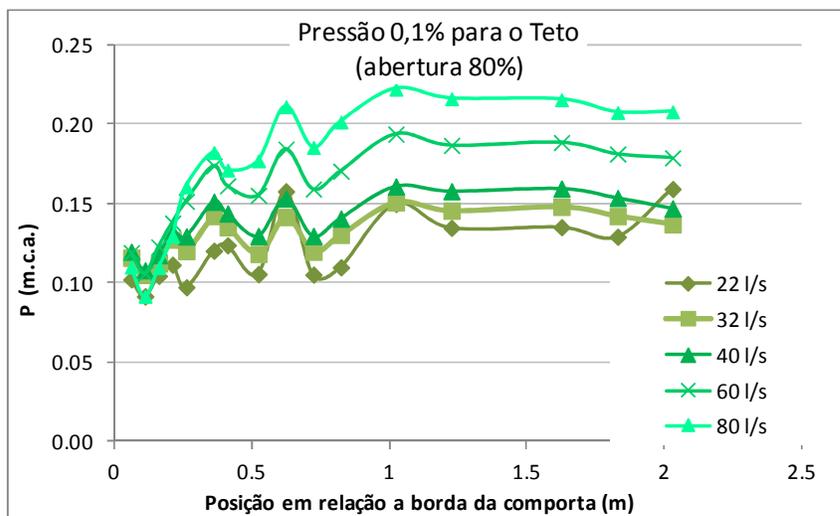
(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXXVI – Comportamento das pressões 0,1% na base, abertura de 80%



(fonte: elaborada pela autora)

Figura XXXVII – Comportamento das pressões 0,1% no teto, abertura de 80%



(fonte: elaborada pela autora)

