

## Eclusas de Navegação: Caracterização das Pressões a Jusante das Válvulas de Enchimento e Esvaziamento para Operação a 60% e 70% de Abertura

Cristiane C. Battiston\*, Edith B. C. Schettini\*, Marcelo G. Marques\*  
cristianebattiston@yahoo.com.br; bcamano@iph.ufrgs.br; mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 20/07/13 - revisado: 15/10/13 - aceito: 26/05/14

### RESUMO

Os problemas hidráulicos encontrados junto às comportas de enchimento e esvaziamento, especialmente a cavitação, estão entre as principais limitações para o aumento da altura de queda das eclusas. Com esta pesquisa, foi possível o aprofundamento dos conhecimentos sobre a dinâmica desse escoamento e, para tanto, foram realizadas testes, em modelo físico reduzido construído no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS.

A partir das tendências dos dados, pôde-se concluir que, para a estrutura em estudo, as condições com abertura da comporta igual a 60% e 70% gerariam as menores pressões médias, respectivamente, na base e no teto do conduto para um mesmo  $\Delta H$ .

Para números de Reynolds superiores a  $3 \times 10^5$ , o comportamento das pressões ao longo da base e do teto do conduto apresentou tendências similares para cada grau de abertura, tendo sido possível descrevê-lo pela relação entre coeficientes adimensionais de posição e de pressão média, máxima e mínima.

**Palavras-chave:** Eclusa, comporta segmento invertida, pressões extremas, hidráulica experimental.

### INTRODUÇÃO

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

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

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

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

O Ministério dos Transportes publicou, em dezembro de 2010, o documento intitulado Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário, que é um avanço no trabalho iniciado com o Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLTL de 2007, que apresenta como meta, para um horizonte de 20 anos, o aumento de 13% para 29% da participação do transporte aquaviário de carga na matriz nacional. O referido documento estabeleceu um conjunto de 62 eclusas a serem implantadas até o ano de 2026, das quais 27 eclusas foram elencadas como prioridade, equivalendo a um investimento estimado em R\$ 11,6 bilhões. Em 2013, era possível destacar apenas 14 eclusas em operação no Brasil, nas hidrovias Paraná-Tietê, São Francisco, Sul e Tocantins.

As eclusas, principalmente as de alta queda, são acompanhadas de diversos fenômenos hidráulicos nocivos que devem ser estudados, de forma a identificar suas características, os problemas associa-

\*Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

dos e as soluções possíveis para evitar que ocorram danos às obras hidráulicas.

A Figura 1 apresenta esquematicamente o perfil de uma eclusa de navegação de câmara simples e os seus principais componentes.

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

comportas de esvaziamento mantendo as de enchimento fechadas.

O acesso de jusante, de forma similar ao acesso de montante, se constitui de um canal de aproximação e de muros guia, porém o acesso de jusante se encontra no extremo com nível de água mais baixo.

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

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

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

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

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

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

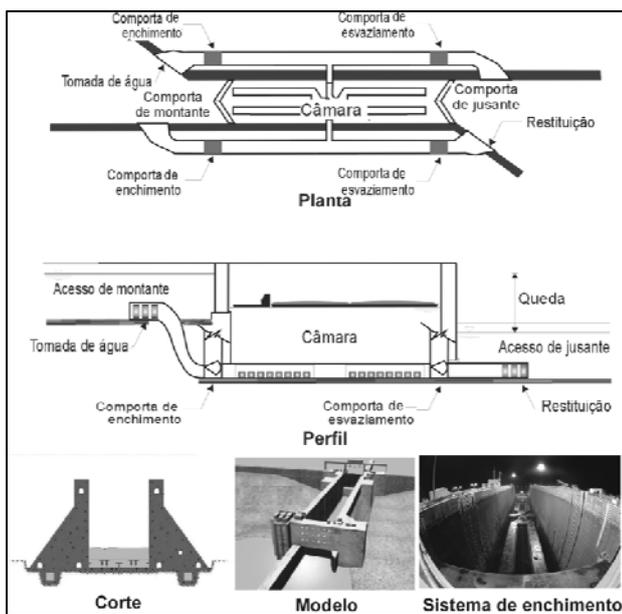


Figura 1 - Componentes das eclusas de navegação.

(Fontes: Adaptado de USACE, 2006;

<<http://www.ahimor.gov.br>>. Acesso em: 08 jun. 2007;

<<http://images.usace.army.mil/photolib.html>>. Acesso em: 05 set. 2006).

A câmara se constitui de um reservatório onde ocorre a variação de nível. Suas barreiras extremas são móveis, permitindo o acesso das embarcações ao seu interior (comportas de montante e jusante).

O sistema de distribuição é um conjunto de elementos hidráulicos que permite o fluxo de água para enchimento e esvaziamento da câmara. Pode-se citar o canal de adução, a tomada de água, os aquedutos, as comportas, o sistema de distribuição e o sistema de restituição. Para se elevar o nível de água na câmara, abrem-se as comportas de enchimento mantendo as de esvaziamento fechadas. Para o abaixamento do nível de água na câmara, abrem-se as

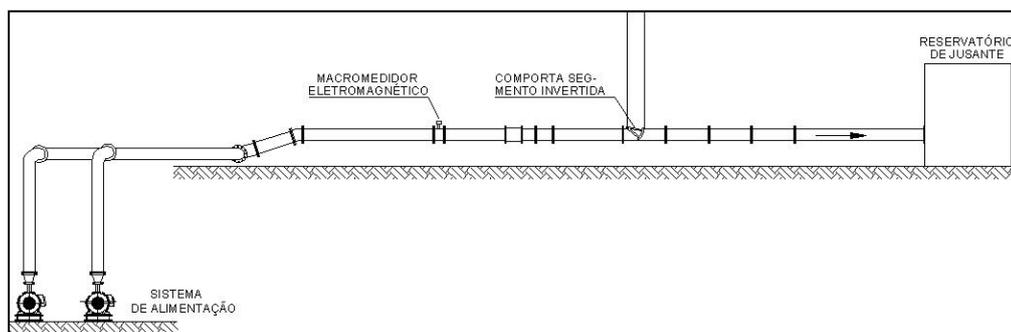


Figura 2 - Desenho esquemático da estrutura experimental.

Observações em modelos e em protótipos revelaram que para a abertura de 60% da comporta ocorrem as condições mais críticas de cavitação (SANTOS, 1998).

Neste artigo, apresenta-se a caracterização das pressões máximas e mínimas verificadas a jusante de uma comporta do tipo segmento invertida, para as condições com 60% e 70% de abertura da comporta, bem como indicam-se os graus de abertura da comporta críticos para a ocorrência das pressões médias mínimas. Para tanto, foi conduzida uma investigação experimental em uma bancada de ensaios instalada no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação experimental deste trabalho foi desenvolvida em uma estrutura constituída de sistema hidráulico de alimentação e restituição de água e uma seção de ensaios.

O sistema de alimentação possuía um reservatório de 600 m<sup>3</sup>, duas bombas hidráulicas, tubulações e acessórios em ferro fundido, com diâmetros de 250 mm e 300 mm. A montante da comporta a vazão foi registrada por meio de um macromedidor eletromagnético, instalado a 3 m e 1,5 m de distância das interferências mais próximas a montante e a jusante, respectivamente. O macromedidor de vazão era da marca Rosemount e possuía diâmetro de 250 mm, faixa de medição de 15,56 Ls<sup>-1</sup> a 465,28 Ls<sup>-1</sup> e vazão mínima medida de 0,62 Ls<sup>-1</sup>. A precisão na leitura era de ±0,5% do índice de 0,3 ms<sup>-1</sup> a 10 ms<sup>-1</sup>, abaixo de 0,3 ms<sup>-1</sup> o sistema tinha precisão de ±0,0015 ms<sup>-1</sup>. A capacidade de repetição era de ±0,1% da leitura e o tempo de resposta era de 0,2 s.

A seção de ensaios era composta de um conduto principal, de seção retangular, de 25 cm por 25 cm, e comprimento total de 8,9 m, construído em fibra de vidro e acrílico, no qual foi instalada a comporta segmento invertida e onde foram acompanhados os fenômenos de interesse deste trabalho. A comporta foi construída em acrílico, com raio de 38 cm, e as vedações foram feitas com borracha. Um reservatório, com um vertedouro em seu interior para a manutenção do nível de água constante a jusante do sistema, recebia a água proveniente do conduto principal e a descarregava em um canal de restituição, que fechava o circuito hidráulico com o reservatório de alimentação, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

As pressões instantâneas foram medidas por meio de transdutores de pressão instalados junto ao fundo da tubulação imediatamente a montante da comporta e junto ao fundo e ao teto da tubulação a jusante da comporta. Os transdutores foram instalados contíguos ao fundo do canal para minimizar a atenuação das pressões instantâneas, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

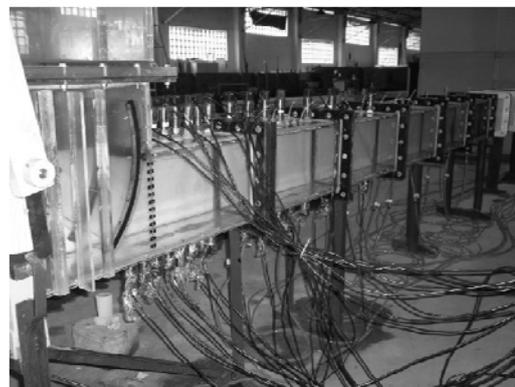
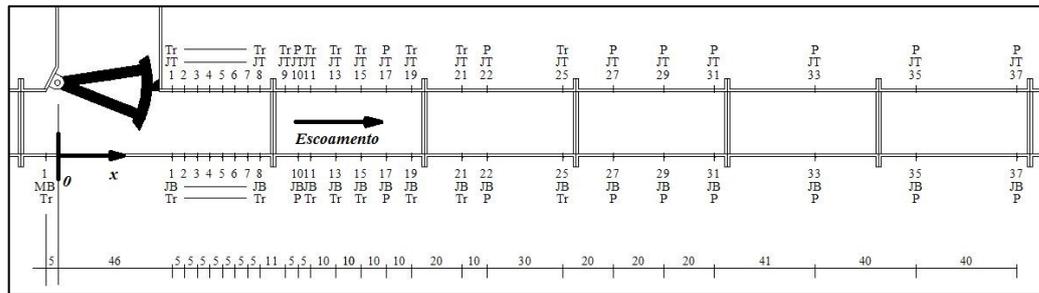


Figura 3 - Vista da estrutura experimental com os equipamentos de medição de pressão.



**Figura 4 - Distribuição dos instrumentos de medição de pressão no perfil da estrutura experimental (Dimensões em centímetros. Tr = transdutor de pressão. P = piezômetro. M= montante, J= jusante. T= teto. B= base do conduto. O número do furo corresponde ao número sequencial a partir da comporta).**

Os transdutores foram conectados a um conversor analógico digital de 12 bits, com duas placas, de 16 canais cada, ligadas a um microcomputador para a armazenagem dos dados. Os registros foram feitos com frequência de 512 HZ e o tempo de aquisição de dados foi de 2 min. Os dados registrados foram convertidos para valores de pressão, em metros de coluna de água (mca), de acordo com as equações de calibração de cada transdutor. As características dos transdutores de pressão utilizados estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Características dos transdutores de pressão utilizados.**

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

Durante os experimentos foram registradas pressões médias e instantâneas ao longo da base e do teto do conduto da seção de ensaios, conforme a distribuição de equipamentos apresentada na Figura 4, na qual **Tr** significa transdutor de pressão, **P** significa piezômetro, o número do furo corresponde ao número sequencial a partir da comporta, **Mé** montante, **J** é jusante, **T** é teto e **B** é base do conduto. Dessa forma, 33JT é a nomenclatura do 33º furo, ou tomada de pressão, a jusante da comporta no teto do conduto. Próximo à comporta, os transdutores de pressão foram posicionados com espaçamento de 5 cm e, conforme o aumento da distância a partir da comporta, o espaçamento entre os transdutores passou para 10 cm, 20 cm e 40 cm.

Os ensaios foram realizados em regime permanente, para diferentes vazões e graus de aberturas da comporta, conforme apresentado na Tabela 2. Não foi permitida a entrada de ar na tubulação durante os ensaios e a saída do conduto de jusante permaneceu submersa.

**Tabela 2 - Tabela de ensaios com medição de pressão instantânea.**

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

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento das pressões médias, registradas nos testes nos pontos centrais da base e do teto ao longo do conduto a jusante da comporta segmento invertida, variou em função da vazão de ensaio e da abertura da comporta.

Para os casos de comporta parcialmente aberta, a pressão na base do conduto a jusante da comporta diminuiu até encontrar a seção da *vena contracta*, trecho onde a energia potencial foi convertida em energia cinética. A *vena contracta* representou o ponto de menor pressão e maior velocidade. A partir desse ponto, a energia cinética voltou a ser convertida em energia potencial e a pressão aumentou gradativamente até encontrar o equilíbrio com a energia potencial necessária para vencer as perdas de carga até o reservatório de jusante. Já

no teto do conduto, as menores pressões medidas foram as mais próximas à comporta, na região de recirculação do escoamento.

Para uma mesma vazão, os menores valores de pressão média (pressão média mínima) na base e no teto foram registrados para os menores graus de abertura da comporta testados. Nas eclusas de navegação, a queda determina as vazões máximas para cada abertura da comporta. As pressões medidas, em altura de coluna de água, foram adimensionalizadas pela altura da seção transversal do conduto ( $D$ ). A diferença de pressão ( $\Delta H$ ), em altura de coluna de água, entre montante e jusante da comporta foi calculada a partir das medições nas tomadas 1MB e 37JB.

Verificou-se que a pressão média mínima junto à base e ao teto do conduto, para um mesmo  $\frac{\Delta H}{D} > 1,5$ , apresentou a tendência de reduzir linearmente de valor com o aumento da diferença de pressão, conforme as Figuras 5 e 6 e a Equação 1. A exceção a esse comportamento foi a condição com 80% de abertura da comportana base do conduto, na qual se observou aumento da pressão média mínima com o aumento da diferença de pressão.

$$\frac{Pm\acute{m}}{D} = b \frac{\Delta H}{D} + c \quad (1)$$

Os coeficientes  $b$  e  $c$  da Equação 1e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) com os dados experimentais encontram-se na Tabela 3. Essa equação permite a estimativa da pressão média mínima, em metros de coluna de água (mca), em função do diferencial de pressão.

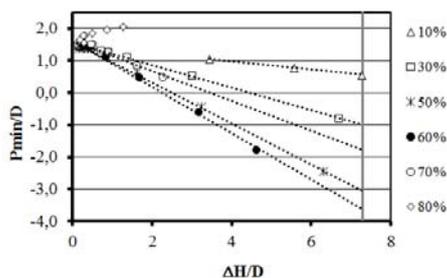


Figura 5 - Comportamento da pressão média mínima ( $P_{m\acute{m}}$ ) na base do conduto em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta ( $\Delta H$ ), adimensionalizadas pela altura da seção transversal do conduto ( $D$ ), para cada grau de abertura da comporta (em %).

Pôde-se concluir que, para a estrutura em estudo, as condições com abertura da comporta igual a 60% e 70% gerariam as menores pressões médias, respectivamente, na base e no teto do conduto para um mesmo  $\Delta H$ .

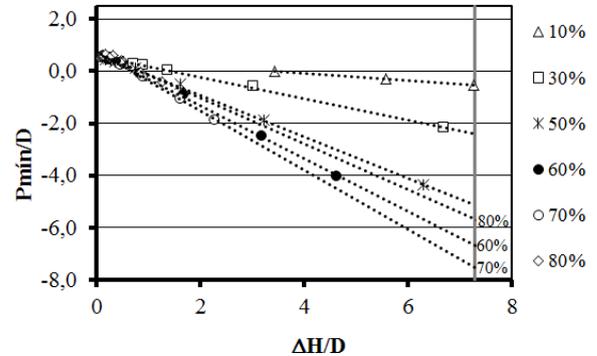


Figura 6 - Comportamento da pressão média mínima ( $P_{m\acute{m}}$ ) no teto do conduto em função da diferença de pressão entre montante e jusante da comporta ( $\Delta H$ ), adimensionalizadas pela altura da seção transversal do conduto ( $D$ ), para cada grau de abertura da comporta (em %).

Tabela 3 – Coeficientes de ajuste para a Equação 1.

$a/D$	Base do conduto			Teto do conduto		
	$b$	$c$	$R^2$	$b$	$c$	$R^2$
10%	-0,126	1,479	0,999	-1,141	0,479	1,00
30%	-0,350	1,552	0,999	-0,408	0,592	0,999
50%	-0,638	1,598	0,998	-0,795	0,687	0,999
60%	-0,721	1,623	0,996	-1,014	0,720	0,999
70%	-0,463	1,609	0,929	-1,135	0,765	0,992
80%	-	-	-	-0,879	0,741	0,960

### Coeficientes de pressão

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

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

nolds. Associada a esses parâmetros, a altura do conduto é o comprimento característico da geometria da estrutura em estudo que exerce influência determinante no comportamento das pressões, uma vez que é responsável pelo confinamento do jato parietal formado a partir da comporta e, consequentemente, pelo tamanho da zona de recirculação do escoamento.

Para os casos com a comporta parcialmente aberta, de acordo com os parâmetros que influenciam a distribuição de pressões, foi possível o agrupamento de condições com tendências similares utilizando-se o número de Reynolds ( $Re$ ). O  $Re$  foi calculado para a seção imediatamente a jusante da comporta, utilizando a velocidade média do jato parietal como a velocidade característica do escoamento, que é a velocidade média do fluxo principal na seção, a altura do conduto como o comprimento característico da geometria em estudo, e a viscosidade cinemática da água. Nos testes realizados, o  $Re$  variou entre  $1,1 \times 10^5$  e  $1,4 \times 10^6$  e as tendências se apresentaram similares para  $Re$  superiores a  $3 \times 10^5$ .

Para os escoamentos com  $Re$  superior a  $3 \times 10^5$ , o comportamento das pressões médias e extremas ao longo da base e do teto do conduto foi descrito por um coeficiente adimensional da posição ( $L_{adm}$ ) e por um coeficiente adimensional de pressão ( $CP$ ).

O coeficiente de posição ( $L_{adm}$ ) foi obtido pela relação entre a posição ( $L_i$ ) dos pontos de medição, a partir do terminal da comporta, e a altura resultante do diferencial entre a altura do conduto ( $D$ ) e a da abertura da comporta ( $a$ ), dada pela Equação 2. O diferencial entre a altura do conduto ( $D$ ) e a da abertura da comporta ( $a$ ) representa a altura que a comporta ocupa no conduto, altura essa que tem uma influência direta no comprimento da área de recirculação formada a jusante da comporta e, consequentemente, no comportamento das pressões junto à base e ao teto do conduto.

$$L_{adm} = \frac{L_i}{D - a} \quad (2)$$

Os coeficientes de pressão, expressões da relação entre a energia potencial e a energia cinética do escoamento, são amplamente utilizados em análises hidráulicas, como, por exemplo, nos trabalhos de Schlichting (1957) e Lopardo (2005). Nas equações dos coeficientes de pressão deste trabalho, foi aplicado o diferencial entre a energia cinética média na seção sob a comporta e a energia cinética média do escoamento a jusante da comporta, pois essa

variação de energia influencia diretamente as pressões que ocorrem no escoamento na região de interesse. Poderia ser interessante a utilização da energia cinética média na seção da *vena contracta*. Contudo, isso dificultaria a utilização da relação proposta, pois a contração do escoamento a jusante da comporta seria uma estimativa. As velocidades médias na seção da comporta e do conduto são de cálculo fácil para cada vazão e abertura da comporta e, por isso, foram adotadas.

Para representar a relação entre os coeficientes de pressão e o coeficiente da posição adimensional ( $L_{adm}$ ), foram testadas diversas curvas, como as exponenciais, de potência, logarítmicas, dos modelos de Harris e Gaussiano. Para a seleção das equações que melhor representavam a relação entre os dados adimensionalizados, foram feitas a análise visual das curvas e a análise do desvio padrão e do coeficiente de correlação entre os dados e as curvas ajustadas.

Na sequência, são apresentadas as relações que permitem a estimativa dos coeficientes de pressão média e de pressões mínimas e máximas para escoamentos com 60% e 70% de abertura da comporta.

### Pressões médias

O coeficiente de pressão média ( $\overline{CP}$ ) foi obtido da relação entre a pressão média subtraída da pressão média que ocorreria no mesmo ponto de medição para 100% de abertura da comporta, permitindo o tratamento isolado da influência do grau de abertura da comporta no comportamento das pressões médias, e a diferença entre a energia cinética média na seção sob a comporta e a energia cinética média do escoamento a jusante da comporta. A expressão do coeficiente  $\overline{CP}$  é dada pela Equação 3.

$$\overline{CP} = \frac{\bar{P} - \bar{P}_{a100\%}}{\frac{v_a^2 - v_D^2}{2g}} \quad (3)$$

Para a base do conduto a relação entre  $\overline{CP}$  e  $L_{adm}$  foi melhor representada, para cada grau de abertura da comporta, pela Equação 4.

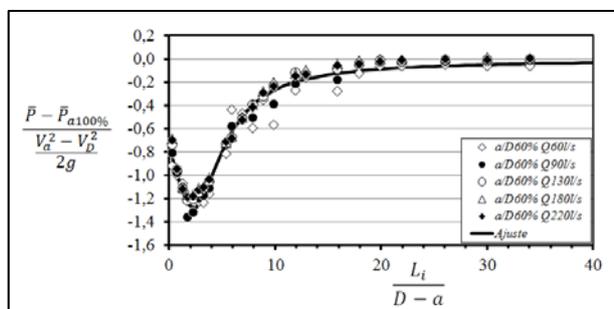
$$\overline{CP} = \frac{b_1 + b_2 L_{adm}}{1 + b_3 L_{adm} + b_4 L_{adm}^2} \quad (4)$$

Os coeficientes  $b_i$  da Equação 4 são apresentados na Tabela 4, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre as curvas ajustadas e

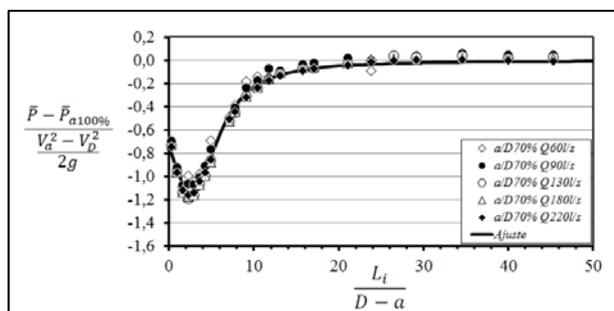
os dados experimentais, que são mostrados nas Figuras 7 e 8.

**Tabela 4 – Coeficientes  $b_i$  para a Equação 4, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $\overline{Cp}$  para a base do conduto.**

Coeficiente	$a/D$	
	60%	70%
$b_1$	-0,75448	-0,75199
$b_2$	-0,07542	0,00007
$b_3$	-0,29686	-0,26400
$b_4$	0,07663	0,04931
Desvio Padrão	0,157	0,066
$R^2$	0,95	0,99



**Figura 7 -  $\overline{Cp}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=60\%$ .**



**Figura 8 -  $\overline{Cp}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=70\%$ .**

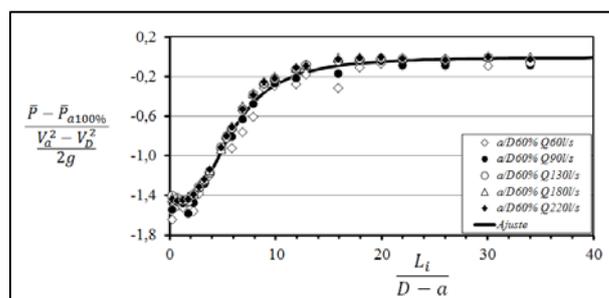
Para o teto do conduto a relação entre o coeficiente de pressão média ( $\overline{Cp}$ ) e o coeficiente da posição adimensional ( $L_{adm}$ ) foi melhor representada pela Equação 5.

$$\overline{Cp} = \frac{1}{t_1 + t_2 L_{adm} + t_3} \quad (5)$$

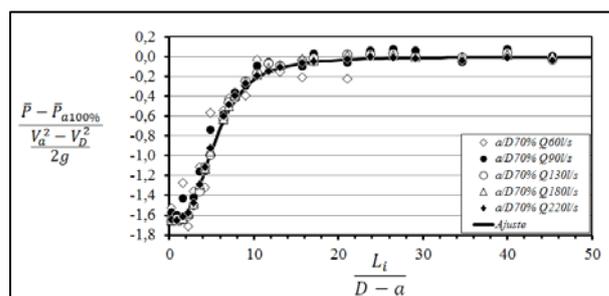
Os coeficientes  $t_i$  da Equação 5 são apresentados na Tabela 5, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação entre as curvas ajustadas e os dados experimentais, que são mostrados nas Figuras 9 e 10.

**Tabela 5 – Coeficientes  $t_i$  para a Equação 5, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $\overline{Cp}$  para o teto do conduto.**

Coeficiente	$a/D$	
	60%	70%
$t_1$	-0,65331	-0,60448
$t_2$	-0,00482	-0,00337
$t_3$	2,78370	3,03151
Desvio Padrão	0,144	0,176
$R^2$	0,97	0,96



**Figura 9 -  $\overline{Cp}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D=60\%$ .**



**Figura 10 -  $\overline{Cp}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D=70\%$ .**

### Pressões extremas

Para a representação das pressões mínimas, foram escolhidos os coeficientes de pressão denominados  $CP_{0,1\%}$  e  $CP_{1\%}$ , calculados para as pressões com probabilidade de serem igualadas ou superadas

em 99,9% e 99% das ocorrências, respectivamente. E, para a representação das pressões máximas, foram escolhidos os coeficientes de pressão denominados  $CP_{99,9\%}$  e  $CP_{99\%}$ , calculados para as pressões com probabilidade de serem igualadas ou superadas em 0,1% e 1% das ocorrências, respectivamente.

Conforme demonstrado por Mees (2008), os coeficientes de pressão para os valores extremos de pressão calculados a partir de medições em modelos reduzidos apresentam grande dispersão de valores, caracterizando a dificuldade de medição de valores extremos absolutos em modelos reduzidos. Por isso, os coeficientes  $CP_{0,1\%}$ ,  $CP_{1\%}$ ,  $CP_{99,9\%}$  e  $CP_{99\%}$  são amplamente utilizados nas análises das pressões extremas, mas cabe a ressalva de Mees (2008) de que esses valores são distantes dos extremos absolutos e não oferecem valores conservadores de pressão.

$CP_{0,1\%}$  e  $CP_{1\%}$  foram obtidos a partir das Equações 6 e 7.

$$CP_{0,1\%} = \frac{P_{0,1\%} - \bar{P}}{\frac{v_a^2 - v_D^2}{2g}} \quad (6)$$

$$CP_{1\%} = \frac{P_{1\%} - \bar{P}}{\frac{v_a^2 - v_D^2}{2g}} \quad (7)$$

$CP_{99,9\%}$  e  $CP_{99\%}$  foram obtidos a partir das Equações 8 e 9.

$$CP_{99,9\%} = \frac{P_{99,9\%} - \bar{P}}{\frac{v_a^2 - v_D^2}{2g}} \quad (8)$$

$$CP_{99\%} = \frac{P_{99\%} - \bar{P}}{\frac{v_a^2 - v_D^2}{2g}} \quad (9)$$

#### Coeficientes de pressão extrema junto à base do conduto

Para a base do conduto, as relações entre  $CP_{0,1\%}$  e  $CP_{1\%}$  e  $L_{adm}$  foram representadas pelas Equações 10 e 11.

$$CP_{0,1\%} = \frac{ab_1 + ab_2 L_{adm}}{1 + ab_3 L_{adm} + ab_4 L_{adm}^2} \quad (10)$$

$$CP_{1\%} = \frac{bb_1 + bb_2 L_{adm}}{1 + bb_3 L_{adm} + bb_4 L_{adm}^2} \quad (11)$$

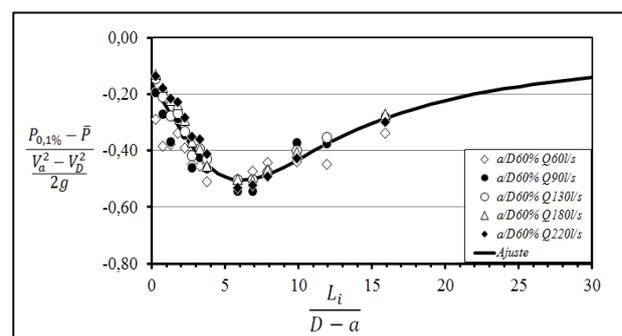
Os coeficientes  $ab_i$  e  $bb_i$  estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 6 e 7, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre as curvas ajustadas e os dados experimentais, que estão apresentados nas Figuras de 11 a 14.

**Tabela 6 – Coeficientes para a Equação 10, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{0,1\%}$  para a base do conduto.**

Coeficiente	a/D	
	60%	70%
$ab_1$	-0,1654	-0,2357
$ab_2$	-0,0597	-0,1295
$ab_3$	-0,1014	0,1589
$ab_4$	0,0179	0,0119
Desvio Padrão	0,048	0,084
$R^2$	0,91	0,52

**Tabela 7 – Coeficientes para a Equação 11, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{1\%}$  para a base do conduto.**

Coeficiente	a/D	
	60%	70%
$bb_1$	-0,120	-0,174
$bb_2$	-0,045	-0,080
$bb_3$	-0,125	0,0944
$bb_4$	0,0226	0,0146
Desvio Padrão	0,033	0,049
$R^2$	0,91	0,64



**Figura 11 -  $CP_{0,1\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=60\%$ .**

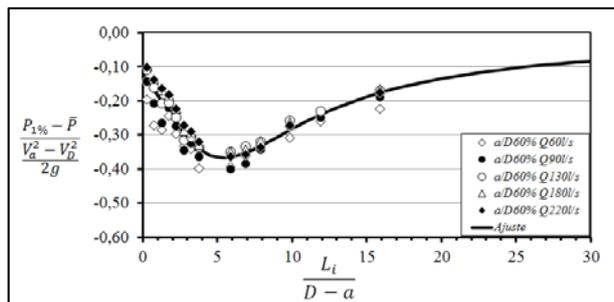


Figura 12 -  $CP_{1\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=60\%$ .

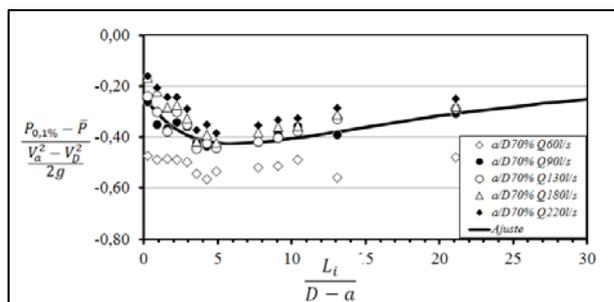


Figura 13 -  $CP_{0,1\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=70\%$ .

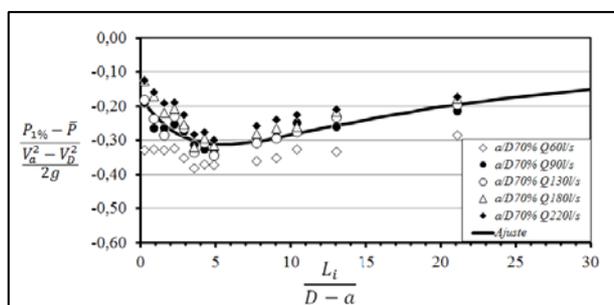


Figura 14 -  $CP_{1\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=70\%$ .

Para a base do conduto, as relações entre  $CP_{99,9\%}$  e  $CP_{99\%}$  e  $L_{adm}$  foram representadas pelas Equações 12 e 13.

$$CP_{99,9\%} = cb_1 \times cb_2^{L_{adm}} \times L_{adm}^{cb_3} \quad (12)$$

$$CP_{99\%} = db_1 \times db_2^{L_{adm}} \times L_{adm}^{db_3} \quad (13)$$

Os coeficientes  $cb_i$  e  $db_i$  estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 8 e 9, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre as curvas ajustadas e os dados experimentais, que estão apresentados nas Figuras de 15 a 18.

Tabela 8 – Coeficientes para a Equação 12, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{99,9\%}$  para a base do conduto.

Coeficiente	a/D	
	60%	70%
$cb_1$	0,3780	0,3846
$cb_2$	0,8410	0,9397
$cb_3$	0,8084	0,3013
Desvio Padrão	0,050	0,085
$R^2$	0,94	0,62

Tabela 9 – Coeficientes para a Equação 13, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{99\%}$  para a base do conduto.

Coeficiente	a/D	
	60%	70%
$db_1$	0,2674	0,2767
$db_2$	0,8501	0,9403
$db_3$	0,7431	0,2948
Desvio Padrão	0,036	0,055
$R^2$	0,93	0,65

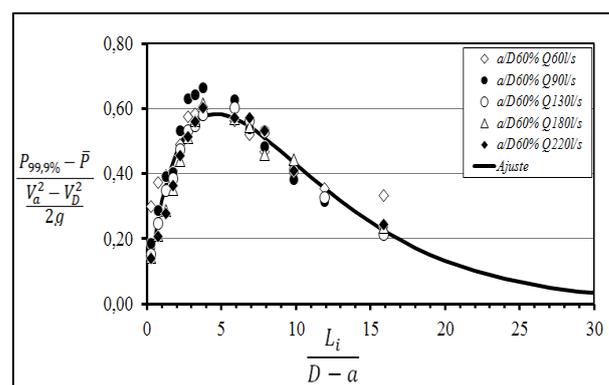


Figura 15 -  $CP_{99,9\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=60\%$ .

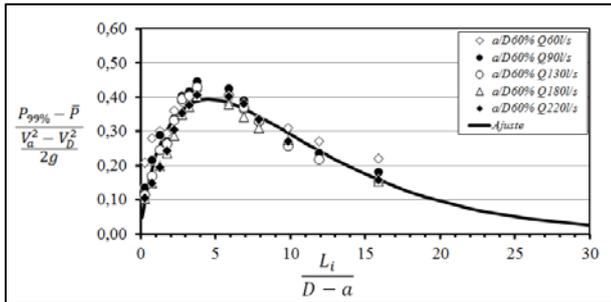


Figura 16 -  $CP_{99\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=60\%$ .

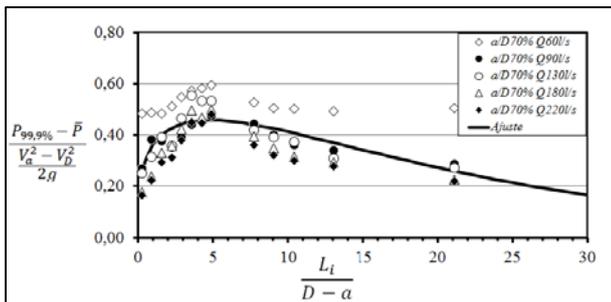


Figura 17 -  $CP_{99,9\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=70\%$ .

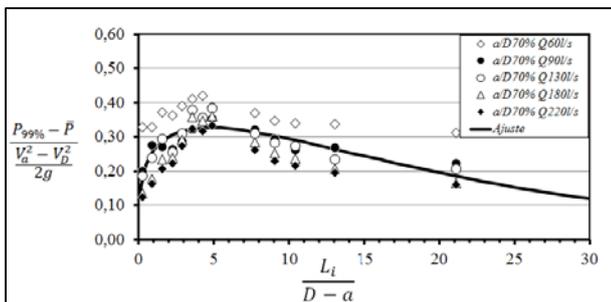


Figura 18 -  $CP_{99\%}$  ao longo da base do conduto para  $a/D=70\%$ .

**Coefficientes de pressão extrema junto ao teto do conduto**

Para o teto do conduto, as relações entre  $CP_{0,1\%}$  e  $CP_{1\%}$  e  $L_{adm}$  foram representadas pelas Equações 14 e 15.

$$CP_{0,1\%} = \frac{at_1 + at_2 L_{adm}}{1 + at_3 L_{adm} + at_4 L_{adm}^2} \quad (14)$$

$$CP_{1\%} = \frac{bt_1 + bt_2 L_{adm}}{1 + bt_3 L_{adm} + bt_4 L_{adm}^2} \quad (15)$$

As equações ajustadas para a condição com 70% de abertura da comporta desconsideraram os dados da vazão de 60 L/s. Esta condição tinha um número de Reynolds igual a  $3,4 \times 10^5$  e seus dados apresentaram um comportamento distinto do das demais condições.

Os coeficientes  $at_i$  e  $bt_i$  estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 10 e 11, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre as curvas ajustadas e os dados experimentais, que estão apresentados nas Figuras de 19 a 22.

Tabela 10 – Coeficientes para a Equação 14, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{0,1\%}$  para o teto do conduto.

Coeficiente	$a/D$	
	60%	70%
$at_1$	-0,3793	-0,4537
$at_2$	-0,0354	-0,0663
$at_3$	-0,1083	-0,0719
$at_4$	0,0149	0,0142
Desvio Padrão	0,049	0,036
$R^2$	0,91	0,97

Tabela 11 – Coeficientes para a Equação 15, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{1\%}$  para o teto do conduto.

Coeficiente	$a/D$	
	60%	70%
$bt_1$	-0,2102	-0,2650
$bt_2$	-0,0190	-0,0452
$bt_3$	-0,1567	-0,1036
$bt_4$	0,0170	0,0161
Desvio Padrão	0,023	0,026
$R^2$	0,97	0,97

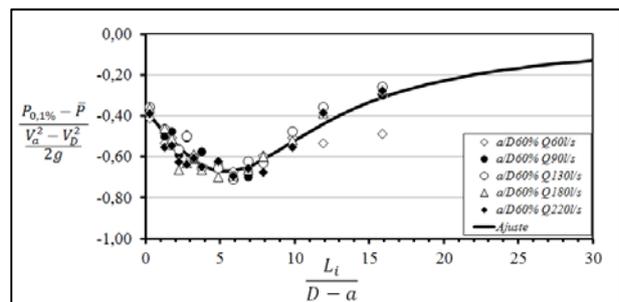


Figura 19 -  $CP_{0,1\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D=60\%$ .

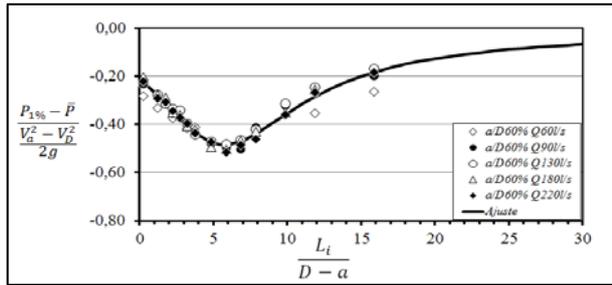


Figura 20 -  $CP_{1\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D = 60\%$ .

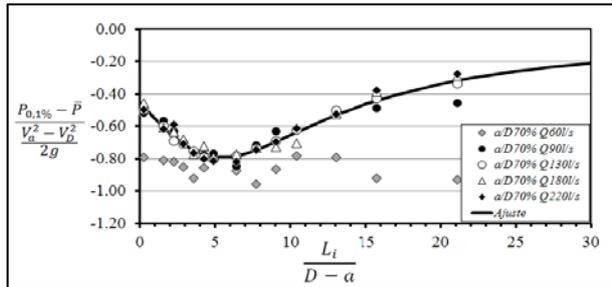


Figura 21 -  $CP_{0,1\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D = 70\%$ .

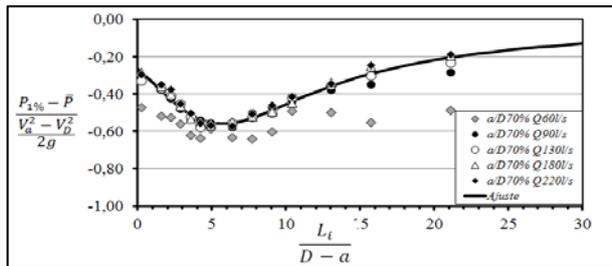


Figura 22 -  $CP_{1\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D = 70\%$ .

Para o teto do conduto, as relações entre  $CP_{99,9\%}$  e  $CP_{99\%}$  e o  $L_{adm}$  foram representadas pelas Equações 16 e 17.

$$CP_{99,9\%} = \frac{ct_1 + ct_2 L_{adm}}{1 + ct_3 L_{adm} + ct_4 L_{adm}^2} \quad (16)$$

$$CP_{99\%} = \frac{dt_1 + dt_2 L_{adm}}{1 + dt_3 L_{adm} + dt_4 L_{adm}^2} \quad (17)$$

Novamente, no ajuste das equações para a condição com 70% de abertura da comporta, foram desconsiderados os dados da vazão de 60 L/s.

Os coeficientes  $ct_i$  e  $dt_i$  estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 12 e 13, bem como o desvio padrão e o coeficiente de correlação ( $R^2$ )

entre as curvas ajustadas e os dados experimentais, que estão apresentados nas Figuras de 23a26.

Tabela 12 – Coeficientes para a Equação 16, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{99,9\%}$  para o teto do conduto.

Coeficiente	$a/D$	
	60%	70%
$ct_1$	0,2104	0,2837
$ct_2$	0,0628	0,0901
$ct_3$	-0,1641	-0,1524
$ct_4$	0,0222	0,0225
Desvio Padrão	0,051	0,052
$R^2$	0,95	0,97

Tabela 13 – Coeficientes para a Equação 17, que estabelece a relação entre  $L_{adm}$  e  $CP_{99\%}$  para o teto do conduto.

Coeficiente	$a/D$	
	60%	70%
$dt_1$	0,1540	0,2061
$dt_2$	0,0353	0,0621
$dt_3$	-0,1816	-0,1441
$dt_4$	0,0226	0,0225
Desvio Padrão	0,027	0,029
$R^2$	0,97	0,98

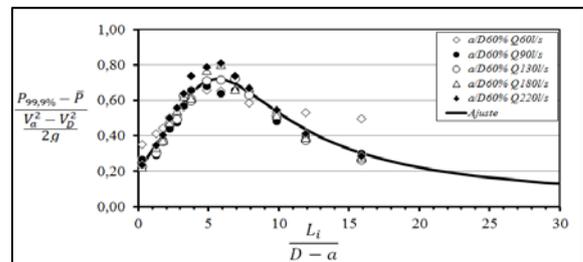


Figura 23 -  $CP_{99,9\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D = 60\%$ .

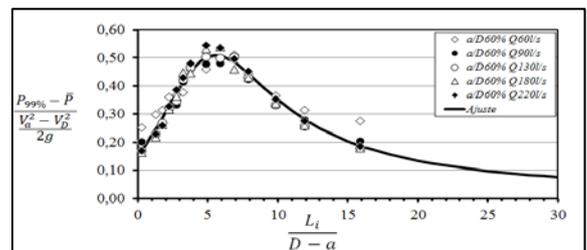


Figura 24 -  $CP_{99\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D = 60\%$ .

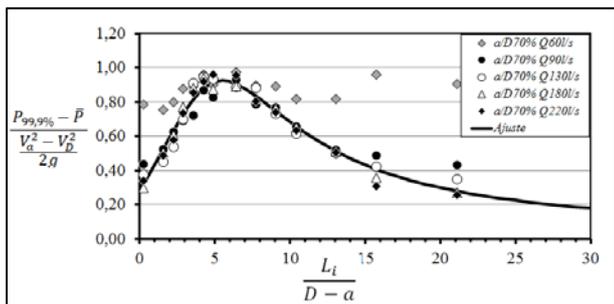


Figura 25 -  $CP_{99,9\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D = 70\%$ .

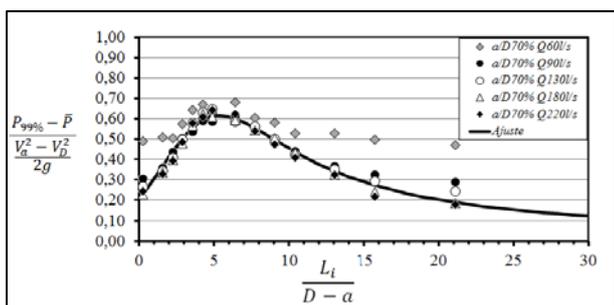


Figura 26 -  $CP_{99\%}$  ao longo do teto do conduto para  $a/D = 70\%$ .

Na base do conduto, os coeficientes de pressão média e de pressão mínima tenderam a apresentar valores que diminuem conforme aumenta a distância da comporta até determinado ponto, ponto de inflexão da curva, a partir do qual os valores dos coeficientes passaram a aumentar. Diferentemente do que ocorreu para os valores dos coeficientes de pressão máxima, que tenderam a aumentar com o aumento da distância da comporta até um limite a partir do qual começaram a diminuir. Para  $\overline{CP}$ , o ponto de inflexão da curva ajustada ficou na posição  $L_{adm}$  entre 2 e 3, e para os coeficientes de pressão extrema, ficou na posição  $L_{adm}$  entre 4 e 6.

Para o teto do conduto, os coeficientes de pressão máxima tenderam a aumentar com o aumento da distância da comporta até um limite a partir do qual começaram a diminuir, com o ponto de inflexão da curva ajustada entre a posição  $L_{adm}$  entre 5 e 6. Os valores de  $CP_{99,9\%}$  e  $CP_{99\%}$  foram maiores conforme aumentou a abertura da comporta e os valores mínimos do coeficiente de pressão média diminuíram conforme aumentou o grau de abertura da comporta.

Os coeficientes de pressão mínima no teto do conduto tenderam a apresentar valores que di-

minuem conforme aumenta a distância da comporta até determinado ponto a partir do qual os valores dos coeficientes passam a aumentar, com o ponto de inflexão da curva ajustada entre a posição  $L_{adm}$  entre 5 e 6. Conforme aumentou o grau de abertura da comporta, diminuíram os valores de  $CP_{0,1\%}$  e  $CP_{1\%}$  para o teto do conduto.

Os coeficientes de pressões extremas auxiliam na avaliação da flutuação das pressões. As flutuações de pressão estão relacionadas com a dinâmica do escoamento no interior do conduto e foram influenciadas pela abertura da comporta e pela vazão. As maiores flutuações de pressão na base foram se afastando da comporta conforme aumentou a abertura da comporta. O inverso ocorreu no teto do conduto, no qual a posição do pico das flutuações de pressão ocorreu na região onde a expansão do jato, que sai sob a comporta, atingiu o teto. Tanto no teto quanto na base do conduto, as maiores flutuações de pressão foram registradas para 70% de abertura da comporta.

## CONCLUSÕES

Os problemas hidráulicos encontrados junto às comportas de enchimento e esvaziamento, especialmente a cavitação, estão entre as principais limitações para o aumento da altura de queda das eclusas.

A literatura indica a abertura de 60% como a mais crítica à ocorrência de cavitação. Os dados experimentais indicam que, para a estrutura em estudo, as condições com abertura da comporta igual a 60% e 70% gerariam as menores pressões médias, respectivamente, na base e no teto do conduto para um mesmo  $\Delta H$ . Associando essa verificação às observações de que as menores pressões ocorrem no teto do conduto e que as maiores flutuações de pressão ocorreram para 70% de abertura da comporta, pode-se concluir que essa abertura é de especial interesse aos projetistas quanto à ocorrência das pressões mínimas e de cavitação.

Para números de Reynolds superiores a  $3 \times 10^5$ , o comportamento das pressões ao longo da base e do teto do conduto apresentou tendências similares para cada grau de abertura, tendo sido possível descrevê-lo pela relação entre coeficientes adimensionais de posição e de pressão média, máxima ( $CP_{99,9\%}$  e  $CP_{99\%}$ ) e mínima ( $CP_{0,1\%}$  e  $CP_{1\%}$ ).

As curvas ajustadas permitem, para uma estrutura com a mesma geometria estudada e 60% e

70% de abertura da comporta, prever, ao longo da base e do teto do conduto a jusante da comporta segmento invertida, as pressões médias e as pressões com probabilidade de serem igualadas ou superadas em 0,1%, 1%, 99,9% e 99%, das ocorrências, a partir dos seguintes dados de entrada: posição do ponto de interesse, pressão média no ponto de interesse para a condição com a comporta completamente aberta, velocidade média do escoamento sob a comporta e no conduto a jusante desta e altura da seção transversal do conduto.

O ajuste entre os dados experimentais e as curvas escolhidas foi considerado bom, com o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) se mantendo acima de 0,9 para todos os casos, exceto para os coeficientes de pressão extrema na base do conduto para a condição de 70% de abertura da comporta, situação em que  $R^2$  variou entre 0,52 e 0,65.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

Agradecemos aos colaboradores do Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH e do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos - LAHE de FURNAS Centrais Elétricas S/A.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Estatísticas da Navegação Interior 2011. 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Informativo Trimestral da Navegação Interior. 3º Trimestre de 2012. 2013.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Diretrizes da política nacional de transporte hidroviário. 2010. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/04-hidro/7-snv-hidro/diret-pnth.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2013.

LOPARDO, R.A. Una aproximación a estudio de flujos macro-turbulentos en resalto hidráulico. Curso ministrado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre: 2005.

MEES, A.A.A. Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Dissertação de mestrado. IPH/UFRGS, Porto Alegre: 2008.

PETRY, B., PALMIER, L.R. Contribuições para a otimização de leis de manobra de comportas de controle de vazão em aquedutos de eclusas de navegação. Revista Latino Americana de Hidráulica. IAHR. Julho, 1992. nº 5.

SANTOS, S.R. Projeto hidráulico de eclusas de alta queda. Tese de livre docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 1998. v. 1 e 2.

SCHLICHTING, H. Cascade Flow Problems. Report 93. North Atlantic Treaty Organization. Paris: 1957. Disponível em <http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/AGARD/R/AGARD-R-93/AGARD-R-93.pdf>

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydraulic Design of Navigation Locks. EM 1110-2-1604. 2006. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1604/entire.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2006.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Lock Culvert valves; hydraulic design considerations. ERDC/CHL TR-11-4. 2011. Disponível em: <[http://www.usace.usace.org/presentation/HHC-Misc/Hydraulic\\_Design\\_of\\_Lock\\_Culvert\\_Valves\\_Stockstill\\_Richard.pdf](http://www.usace.usace.org/presentation/HHC-Misc/Hydraulic_Design_of_Lock_Culvert_Valves_Stockstill_Richard.pdf)>. Acesso em: 05 abr. 2012.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Planning and Design of Navigation Locks. EM 1110-2-2602. 1995. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-2602/entire.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2006.

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

## Notação

$a$  = abertura da comporta ou bocal [L]  
 $g$  = aceleração devida à gravidade [ $LT^{-2}$ ]  
 $CP$  = coeficiente de pressão  
 $\overline{CP}$  = coeficiente de pressão média  
 $CP_{0,1\%}$  = coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 99,9% das ocorrências

$CP_{1\%}$  = coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 99% das ocorrências

$CP_{99,9\%}$  = coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 0,1% das ocorrências

$CP_{99\%}$  = coeficiente de pressão com probabilidade de ser igualada ou superada em 1% das ocorrências

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

$H$  = carga hidráulica [L]

$\Delta H$  = diferença de carga hidráulica [L]

$L_{adm}$  = coeficiente de posição

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

$\bar{P}$  = pressão média no ponto de medição [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$\bar{P}_{a100\%}$  = pressão média no ponto de medição 100% de abertura da comporta [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$P_{0,1\%}$  = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99,9% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$P_{1\%}$  = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$P_{99,9\%}$  = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 0,1% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$P_{99\%}$  = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 1% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$Q$  = vazão [ $L^3T^{-1}$ ]

$Re$  = número de Reynolds

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

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

*The behavior of the data showed that, for an equal  $\Delta H$ , the conditions of 60% and 70% of valve opening would result in the lowest mean pressures for the culvert base and roof, respectively.*

*For Reynolds greater than  $3 \times 10^5$ , it was possible to characterize the behavior of the mean and extreme pressures along the culvert base and roof by the relationship between dimensionless coefficients of position and pressure.*

**Key-words:** *Navigation lock, reverse radial gate, reverse tainter gate, extreme pressures, experimental hydraulics.*

### ***Characterization Of Pressures In Filling And Emptying Lock Culverts For Operations With 60% And 70% Of Valve Opening***

#### **ABSTRACT**

*Hydraulic problems in the filling and emptying systems, especially close to the valves, are among the major limitations to increasing the lock lift.*

*This study provided a better understanding of the flow dynamics downstream from lock valves. This was achieved by conducting an experimental investigation in the Laboratório de Obras Hidráulicas of the Instituto de Pesquisas Hidráulicas at the Universidade Federal do Rio Grande do Sul.*