

Análise do Escoamento a Jusante de Válvulas de Eclusas para o Caso de Pequenas Aberturas

C. C. Battiston, G. R. Finger, A. A. A. Mees, A. V. B. Canellas, M. Dai Prá, M. G. Marques, L. A. M. Endres

Resumo – Objetivando o melhor entendimento da dinâmica do escoamento a jusante de válvulas de eclusas de navegação, de forma a aprimorar o projeto dessas estruturas que, no Brasil, são em sua maioria associadas às barragens de usinas hidrelétricas, uma pesquisa experimental vem sendo realizada em uma bancada de ensaios construída no Instituto de Pesquisa Hidráulicas da UFRGS. Para as menores aberturas de comporta, verifica-se a transição de regimes de escoamento, do supercrítico para o subcrítico, caracterizando a formação de um ressalto hidráulico. Este trabalho apresenta a comparação entre os resultados experimentais obtidos com as características de ressalto hidráulico a superfície livre (clássico e submerso). O escoamento a jusante das válvulas, confinado em um conduto, apresentou, em geral, comportamento semelhante ao do ressalto hidráulico, no entanto gerou pressões médias significativamente menores, maiores flutuações de pressão na mesma posição longitudinal e menor perda de energia.

Palavras-chave – Eclusa, Enchimento, Esvaziamento, Ressalto, Tainter.

I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz parte do projeto de Pesquisa & Desenvolvimento intitulado “Análise do comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação”, inscrito na ANEEL sob o código 0394-041/2006 para o ciclo 2005-2006 e desenvolvido pela parceria entre FURNAS Centrais Elétricas, o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

O objetivo geral desse projeto de P&D é analisar o comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação e visa dar continuidade e ampliação a uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida por FURNAS, na área de esforços hidrodinâmicos. O conhecimento da distribuição longitudinal das pressões médias e seus valores extremos a jusante das comportas do sistema de enchimento e esvaziamento, quando da sua operação, permite que se

determinem as condições críticas que possam vir a danificar o sistema durante a sua vida útil. Assim, se pode adotar soluções e critérios de operação que evitem estas condições. Dentro desta visão estão sendo efetuados estudos em modelos físicos com medições de pressões a jusante das comportas de maneira a poder se obter critérios de previsão desses esforços, que poderá ser adotado, tanto na fase de projeto como em obras já existentes.

As eclusas de navegação são mecanismos que têm a função de promover, de forma segura, a transposição de desníveis gerados por barreiras pontuais, naturais (quedas de água e istmos) ou de ação antrópica (barramentos), pelas embarcações.

Os principais componentes de uma eclusa de navegação são descritos na seqüência e podem ser conferidos na Figura 1:

Acesso de montante: 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.

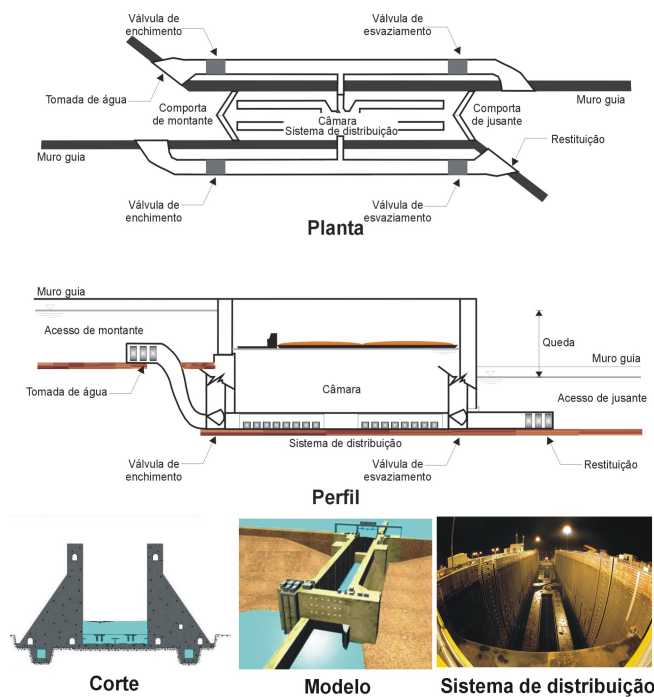


Figura 1 – Componentes das eclusas de navegação – [1], [2], [3].

Câmara: constitui-se 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).

¹ Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

² C.C.Battiston, G.R.Finger, A.A.A.Mees, M.G.Marques e L.A.M.Endres são pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) (email: cristiane**battiston@yahoo.com.br**, guilherme_finger@hotmail.com, alexandremees@gmail.com.br, mmarques@iph.ufrgs.br, endres@ufrgs.br).

³ A.V.B. Canellas e M. Dai Prá trabalham no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas Centrais Elétricas (e-mails: alba@furnas.com.br, mdaipra@gmail.com).

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

Acesso de jusante: de forma similar ao acesso de montante, o acesso de jusante se constitui de um canal de aproximação e de muros guia, porém o acesso de jusante encontra-se situado 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:

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

O número de eclusas de alta queda vem crescendo mundialmente devido à construção de altos barramentos, os quais são geralmente relacionados a usinas hidrelétricas. Com a formação dos reservatórios das usinas existe um favorecimento da navegabilidade no curso de água, no entanto, para a transposição da barragem faz-se necessária a inclusão de eclusas, assunto que vem sendo bastante discutido no Brasil, pois se deseja aumentar a participação desse modal no sistema nacional de transporte de cargas.

As eclusas, principalmente as de alta queda, são estruturas que desafiam a engenharia, 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.

Dois problemas chave são encontrados no projeto de eclusas de alta queda. O primeiro está relacionado às condições de amarração na câmara da eclusa. A fim de satisfazer os critérios de amarração das embarcações, a movimentação da superfície de água na câmara da eclusa deve ser uniforme, exigindo, para tanto, um sistema hidrodinamicamente balanceado. O segundo se refere aos problemas hidráulicos encontrados junto às válvulas. O grande diferencial de pressão entre as faces das válvulas e o curto período exigido para as operações de eclusagem incorrem em velocidades muito altas as quais produzem não somente cavitação, mas exigem um cuidado especial no projeto estrutural das válvulas [4].

O sistema de distribuição hidrodinamicamente equilibrado se caracteriza por dispor de derivações providas de orifícios localizados longitudinalmente no fundo da câmara. As bifurcações e desdobramentos dos aquedutos são projetados de forma a se obter uma partição de vazão bastante equilibrada, visando à tranquilidade da superfície de água dentro da câmara. O atual estágio de evolução dos sistemas de distribuição torna difícil imaginar novas concepções revolucionárias para esses sistemas, contudo, esperam-se soluções para a grande

variedade de problemas específicos que afetam as eclusas de alta queda [5].

Com relação às válvulas de controle de fluxo, as questões fundamentais podem ser resumidas em:

- vibração em função das flutuações de pressão a jusante das válvulas;
- esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação;
- ampliação dos esforços ligados aos fenômenos de *downpull* e *uplift*, fenômenos que se referem ao empuxo descendente e ascendente, respectivamente;
- cavitação,

sendo a cavitação a mais importante das questões listadas, pois além de ser altamente agressiva às estruturas sob sua ação, é a origem das demais questões citadas [6].

A situação operacional que apresenta as maiores complicações hidráulicas é a do início do enchimento, quando a lâmina de água dentro da câmara é a menos favorável, verificam-se 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 [5].

O escoamento a jusante das válvulas, confinado em um conduto, é altamente turbulento e de grande complexidade.

A referência classificou o escoamento a jusante de comportas em condutos em seis tipos, fazendo referência a três deles como ressalto hidráulico.

O ressalto hidráulico se constitui em uma rápida transição de um escoamento supercrítico (número de Froude > 1) para um escoamento subcrítico (número de Froude < 1). Uma parte da energia cinética do escoamento se transforma em energia potencial provocando, quando à superfície livre, uma variação brusca da lâmina de água, a qual é acompanhada de uma grande intensidade de turbulência e . Esse tipo de escoamento pode acontecer em diversas condições e estruturas hidráulicas.

O ressalto hidráulico em condutos de seção fechada difere do ressalto hidráulico à superfície livre devido à limitação da altura pela geometria do conduto .

De acordo com a referência a formação de ressalto hidráulico em condutos é observada a jusante de válvulas de controle e em tubulações, escoando parcialmente cheias, quando há uma transição de alta para baixa declividade. A maioria dos autores que estudaram o ressalto hidráulico em condutos analisou casos de ressaltos formados a jusante de transições de declividade. A referência estudou o caso de um ressalto formado em um conduto a jusante de uma comporta, explicando que em um conduto fechado, o escoamento subcrítico apresenta-se como um escoamento pressurizado a jusante do ressalto, sendo a altura conjugada lenta confinada pelo teto do conduto, conforme Figura 2.

Buscando um melhor entendimento do escoamento a jusante de válvulas de eclusas, este trabalho apresenta a análise dos dados experimentais de pressões médias e instantâneas deste fluxo para o caso de pequenas aberturas, realizando-se, ainda, a comparação das características do ressalto hidráulico a superfície livre (FHJ) com as do escoamento em questão, sendo este tratado como um ressalto hidráulico em um conduto (CHJ).

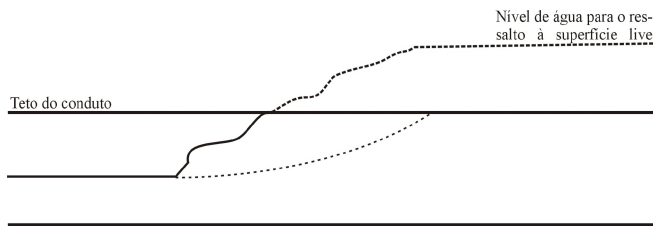


Figura 2 – Limitação da altura da lâmina de água pelo teto do conduto .

II. METODOLOGIA

A. Estrutura Experimental

A investigação experimental do escoamento a jusante de válvulas de eclusas foi desenvolvida em uma bancada de ensaios (Figura 4 e 3) construída no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

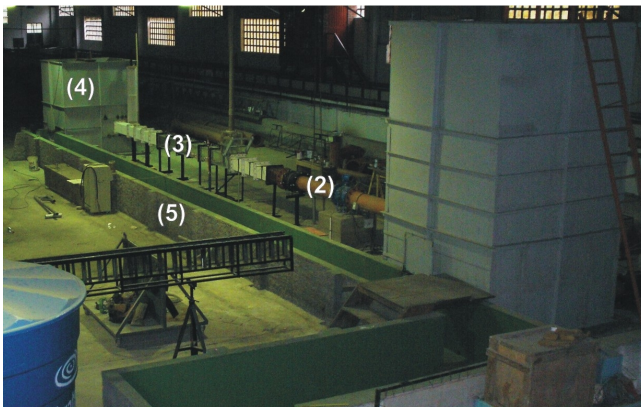


Figura 3 – Bancada de ensaios para estudo do escoamento a jusante de válvulas de eclusas, Vista 1 .

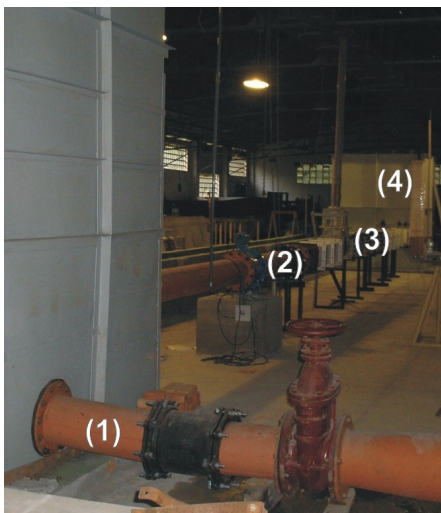


Figura 4 – Bancada de ensaios para estudo do escoamento a jusante de válvulas de eclusas, Vista 2 .

A bancada de ensaios é composta de:

- (1) Sistema de alimentação: composto de um reservatório de 600m³, tubulações e acessórios hidráulicos e duas bombas centrífugas com inversores de frequência;
- (2) Conduto auxiliar: correspondente ao trecho de montante do conduto principal, sua existência está relacionada à instalação do medidor eletromagnético de

vazão. Possui seção transversal circular com diâmetro nominal de 250mm e comprimento total de 5,5m;

(3) Conduto principal: conduto onde está instalada a comporta e onde foram realizadas as medições. Esse conduto foi construído parte em fibra de vidro e parte em acrílico, sendo este utilizado na região do conduto onde a visualização do escoamento apresentava interesse. Esse conduto apresenta seção quadrada de 25cm x 25cm e comprimento total de 8,9m. A comporta instalada é do tipo segmento (ou Tainter) invertida (Figura 5), pois, segundo , é o tipo de comporta normalmente aplicado em eclusas de navegação;

(4) Reservatório de jusante: recebe a água proveniente do conduto principal, com volume total de 7,2m³, com 2,4m de altura e controle do nível d'água por meio de um vertedouro com altura de soleira regulável;

(5) canal de restituição: recebe a descarga do reservatório de jusante, restituindo a água ao reservatório de alimentação.

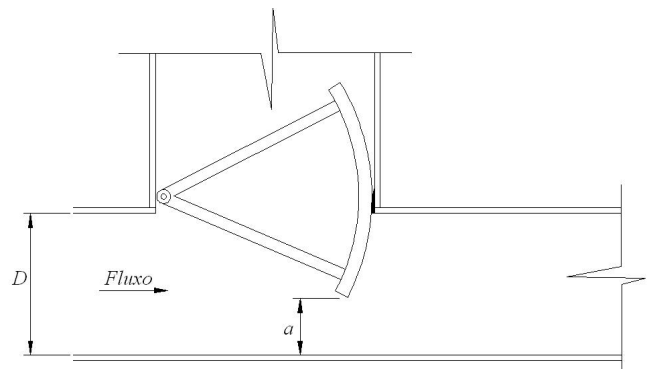


Figura 5 – Esquema de instalação da comporta tipo Tainter invertida no conduto ($D=25\text{cm}$; $a=\text{variável}$).

B. Aquisição de Dados

Durante os testes, foram medidas as pressões médias por meio de piezômetros, pressões instantâneas com transdutores de pressão (Tabela I), abertura da comporta com uma régua e a vazão por meio de um medidor eletromagnético.

Tabela I – Características dos transdutores de pressão implantados na base do conduto e no teto e utilizados neste trabalho.

Quant.	Marca	Faixa de operação (m.c.a.)		Precisão (%F.E.)	Posição
14	Sitron	-1.5	1.5	0.30%	14 a jusante na base do conduto
1	Hytronic	-2.1	4.9	0.25%	1 a montante na base do conduto

As pressões instantâneas foram medidas em tomadas distribuídas ao longo do teto e da base do conduto. As tomadas da base, de interesse neste trabalho, totalizam 15, sendo uma a montante da comporta e catorze a jusante. Próximo à comporta os transdutores de pressão foram posicionados com espaçamento de 5 centímetros entre eles,

conforme o aumento da distância a partir da comporta, o espaçamento entre os transdutores passava para 10cm, 20cm e 40cm (Figura 6).

C. Características dos Ensaios Desenvolvidos

Todos os ensaios foram desenvolvidos em regime permanente, com o conduto totalmente preenchido e sem admissão de ar. A estrutura utilizada não possui aeradores, pois foi construída com objetivo inicial de ser aplicada na avaliação de alternativas geométricas que auxiliem a reduzir o potencial de ocorrência da cavitação, que é bastante significativo.

Para combater a cavitação, comumente o ar é adicionado ao escoamento à jusante de válvulas de eclusas. Porém, quando expelido do sistema, o ar ocasiona perturbações na superfície d'água dentro da câmara da eclusa que, dependendo da magnitude das perturbações, podem provocar acidentes com as embarcações. Dessa forma, a entrada de ar é controlada não segundo a demanda de ar do escoamento, mas tendo como critério maior a manutenção da tranquilidade da superfície de água na câmara.



Figura 6 – Instalação dos transdutores de pressão no conduto.

Neste trabalho foram analisados os dados dos ensaios realizados com abertura da comporta igual a 2,5cm e 7,5cm, correspondentes a 10% e 30% da altura do conduto.

Três diferentes vazões foram impostas com 10% de abertura da comporta e seis com a abertura de 30%. As principais características dos ensaios estão apresentadas na Tabela II.

Tabela II – Características dos ensaios.

a/D	Q (l/s)	V ₁ (m/s)	Fr ₁	V ₂ (m/s)	Fr ₂
10%	22	3,5	7,1	0,4	0,22
10%	28	4,5	9,0	0,4	0,29
10%	32	5,1	10,3	0,5	0,33
30%	22	1,2	1,4	0,4	0,22
30%	28	1,5	1,7	0,4	0,29
30%	32	1,7	2,0	0,5	0,33
30%	40	2,1	2,5	0,6	0,41
30%	60	3,2	3,7	1,0	0,61
30%	90	4,8	5,6	1,4	0,92

onde, a/D é a razão entre a abertura da comporta (a) e a altura do conduto (D), Q é a vazão, V₁ e V₂ são, respectivamente, as velocidades na seção sob a comporta (h=a) e numa seção melhor definida a jusante (h=D), assim como os números de Froude (Fr₁ e Fr₂).

As máximas vazões foram limitadas pela máxima carga hidráulica possível de ser imposta a montante da comporta, de forma que não ocorresse o transbordamento pela câmara da comporta. (Figura 7).

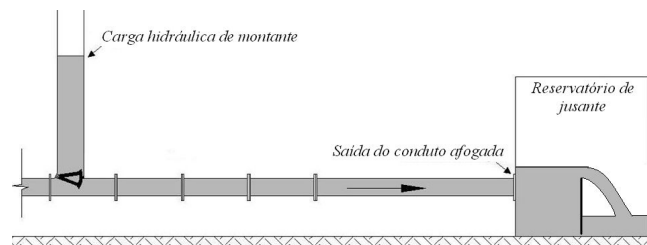


Figura 7 – Limitadores de vazão máximos em função da geometria da estrutura de ensaio.

O nível de água no reservatório de jusante era uma função da vazão e da cota da crista do vertedouro. A cota da crista não foi alterada durante os ensaios, o nível no reservatório de jusante apresentou variação de nível de, aproximadamente, 5cm entre a maior e a menor vazão.

D. Características do Ressalto Hidráulico a superfície Livre

Os dados sobre as características de dissipação de energia e comportamento das pressões médias e instantâneas do ressalto hidráulico a superfície livre foram obtidos dos trabalhos publicados pelas referências a .

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos dos ensaios foram dispostos em formas adimensionais similares às utilizadas na análise do ressalto hidráulico a superfície livre (FHJ). Isso tornou possível sua comparação.

Uma analogia pôde ser feita entre o ressalto submergido e o ressalto em um conduto. Ambos os tipos apresentam na seção de escoamento subcrítico uma altura da água (ou pressão equivalente) superior à altura conjugada lenta esperada para o ressalto hidráulico clássico. Assim, as formas adimensionais escolhidas para este trabalho foram às propostas por , uma vez que este autor considera a influência da submergência nas características do ressalto.

A submergência (S) foi definida como a relação entre a energia potencial no final do ressalto e a altura conjugada lenta, como em (1) e (2) para FHJ e CHJ, respectivamente:

$$S = \frac{Tw}{y_2} \quad (1)$$

$$S = \frac{P_2}{y_2} \quad (2)$$

onde T_w é a lâmina de água e P_2 é a pressão no final do ressalto hidráulico, como exemplificam da Figura 8 à Figura 10, y_1 e y_2 são as alturas conjugadas rápida e lenta consideradas na equação de Bélanger.

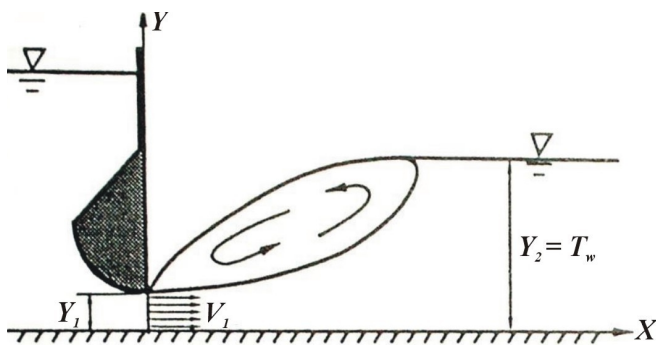


Figura 8 – Ressalto hidráulico clássico .

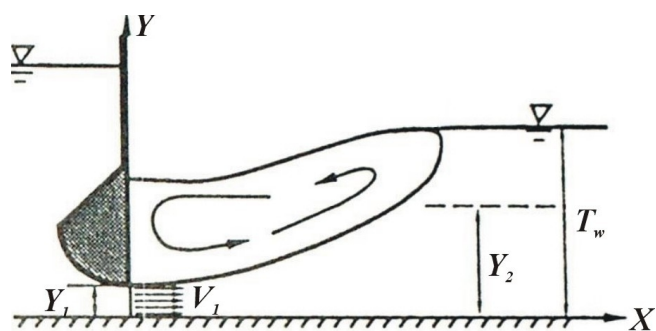


Figura 9 – Ressalto hidráulico submerso .

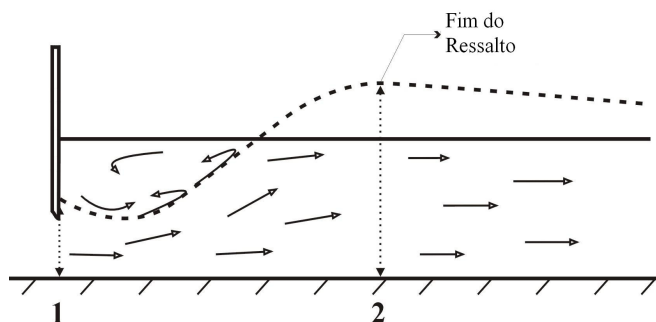


Figura 10 – Esquema da linha piezométrica para o caso do ressalto hidráulico no conduto (CHJ), baseado em .

A. Pressões médias

A Figura 11 mostra a comparação dos dados de pressão média adimensionalizada deste trabalho e de , e sobre o ressalto hidráulico clássico, e sobre o ressalto hidráulico submerso.

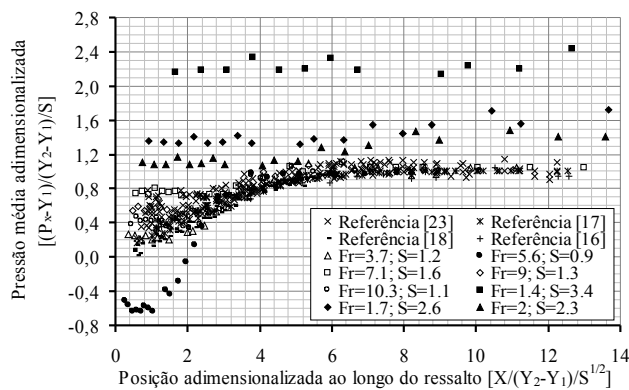


Figura 11 – Comparação das pressões médias adimensionalizadas.

A variável X é a posição longitudinal a partir da seção de escoamento subcrítico (para os escoamentos sem comporta) e é a posição longitudinal a partir da comporta (para o ressalto submerso e confinado no conduto).

As pressões observadas para números de Froude menores ou iguais a 2 apresentaram comportamento bastante distinto em comparação com os outros. Estes números de Froude descrevem um ressalto ondular e, por isso, não são avaliados no presente trabalho.

O ensaio com $a/D=30\%$ e $Fr=5,6$ também apresentou um comportamento divergente, provavelmente causado pelo fato do valor Fr_2 ($Fr=0,92$) ser muito próximo ao relacionado ao valor crítico ($Fr=1$).

Na Figura 12 os dados de pressão média do CHJ são comparados com as linhas de tendência do ressalto hidráulico clássico ($S=1$) e com diferentes níveis de submergência ($S>1$), as quais foram apresentadas por e resumem os dados das referências citadas anteriormente.

Um desenvolvimento muito semelhante pôde ser verificado entre as pressões médias adimensionais do CHJ e do ressalto submerso. No entanto, constatou-se que as pressões médias para a submergência de 1,8 são maiores no CHJ do que no FHJ, mostrando que a adimensionalização das pressões médias não considerou todos os parâmetros envolvidos no fenômeno, tais como a quantidade de ar incorporada, por exemplo.

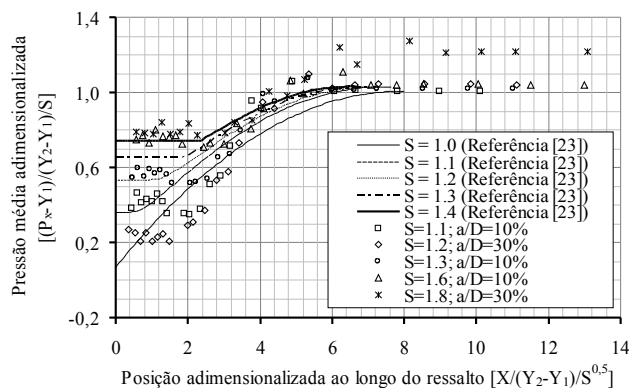


Figura 12 – Comparação das pressões médias adimensionalizadas.

B. Dissipação de energia

A referência computou a energia dissipada pelo FHJ para um número de Froude variando de 1 a 20. A taxa de dissipação de energia devido ao ressalto hidráulico (η) foi

apresentada pelo autor como a relação entre a energia dissipada pelo ressalto hidráulico ($E_1 - E_2$) e o total de energia que entra no mesmo (E_1), em porcentagem, tal como expresso em (3):

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{y_1 - y_2 + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}}{y_1 + \frac{V_1^2}{2g}} \times 100\%, \quad (3)$$

onde E_2 é a energia total no final do ressalto, y_1 , y_2 , V_1 e V_2 são as alturas conjugadas (y) e velocidades (V) nas seções de escoamento supercrítico (subíndice 1) e subcrítico, (subíndice 2).

Para o caso do CHJ, η foi considerado como em (4):

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{P_1 - P_2 + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}}{P_1 + \frac{V_1^2}{2g}} \times 100\%, \quad (4)$$

onde P_1 , P_2 , V_1 e V_2 são as pressões médias e velocidades nas seções de escoamento supercrítico (subíndice 1) e subcrítico (subíndice 2).

A Figura 13 apresenta os resultados da taxa de dissipação de energia.

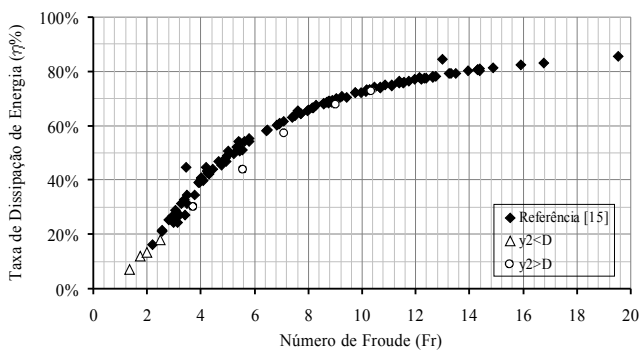


Figura 13 – Taxa de dissipação de energia versus o número de Froude na seção de escoamento supercrítico.

A dissipação de energia aumentou com o número de Froude para ambos os casos. Entretanto, a perda de energia do ressalto confinado (CHJ) foi menor que a perda de carga do ressalto livre (FHJ) quando a altura conjugada lenta (y_2) era maior que a altura do conduto (D). As taxas de dissipação se igualam para o caso em que y_2 iguala D , com foi demonstrado teoricamente por . Para y_2 menor que D a perda de energia parece ser maior no caso do CHJ, mas não

existem pontos suficientes do ressalto hidráulico livre para dar suporte a esta observação.

C. Flutuações de pressão

Uma forma bastante usual de representar adimensionalmente as flutuações de pressão em um ressalto hidráulico é feita por meio do cálculo do coeficiente adimensional de pressão, C'_p , como apresentado em , e , conforme (5):

$$C'_p = \frac{\sigma}{V^2/2g} \quad (5)$$

onde σ é o desvio padrão das flutuações de pressão (em m.c.a.), V é a velocidade na seção de escoamento supercrítico (em m/s) e g é a aceleração devida à gravidade (em m/s²).

Os valores de C'_p são conhecidos para diversas condições de ressalto hidráulico, como pode ser verificado em , e , o que torna esse parâmetro muito conveniente para ser aplicado na comparação entre os dados de flutuação de pressão do FHJ e do CHJ.

A Figura 14 apresenta os valores de C'_p obtidos por diversos autores para ressalto hidráulicos livres com número de Froude na seção de escoamento supercrítico variando de 4,7 a 9,54 e os valores calculados a partir dos dados experimentais para o caso do ressalto hidráulico confinado.

As flutuações de pressão medidas no ressalto hidráulico confinado (CHJ) apresentaram comportamento similar ao relatado pelos outros autores para o ressalto livre: um aumento na magnitude das flutuações próximo à entrada do ressalto e um decréscimo até o seu final. No entanto, os valores de C'_p foram maiores no caso de CHJ do que os observados no ressalto hidráulico livre (FHJ). Um comportamento similar foi observado por . O aumento da submergência foi seguido pelo aumento dos valores do coeficiente adimensional de pressão. Assim, é possível que o confinamento, no caso do CHJ, tenha aumentado o potencial para flutuações de pressão.

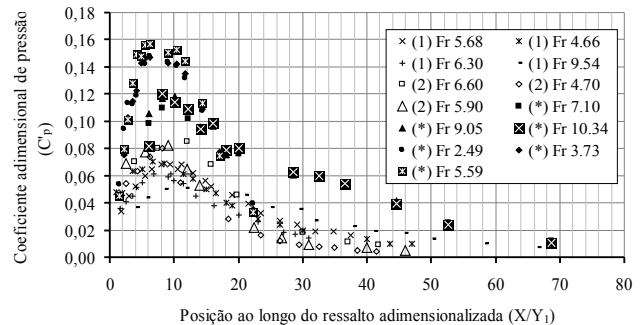


Figura 14 – Comparação entre os valores de C'_p de ressalto hidráulicos livres e confinados em um conduto: (*) – presente trabalho, (1), (2).

A equação (6) define o coeficiente adimensional de pressões extremas:

$$C_p^{x\%} = \frac{P_{n\%} - \bar{P}}{V^2/2g} \quad (6)$$

onde $P_{n\%}$ corresponde ao valor de pressão cujo $n\%$ da amostra apresenta valores inferiores e \bar{P} é o valor da pressão média.

A Figura 15 e a Figura 16 apresentam os coeficientes adimensionais de pressão extrema para as probabilidades de 0,1% (pressões mínimas) e 99,9% (pressões máximas).

Observando os valores absolutos, $C_p^{99,9\%}$ apresentou-se maior que $C_p^{0,1\%}$ em praticamente todos os casos observados. O pico do coeficiente adimensional de pressão extrema se mostrou levemente diferente entre os casos positivo e negativo, parecendo que as pressões mínimas acontecem mais próximas da seção subcrítica que as pressões máximas.

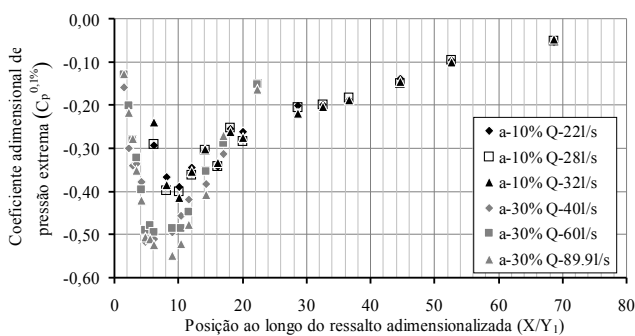


Figura 15 – Coeficiente adimensional de pressão extrema – pressões mínimas: $n\%=0,1\%$.

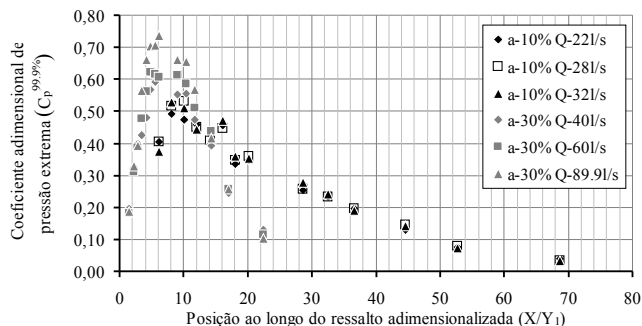


Figura 16 – Coeficiente adimensional de pressão extrema – pressões máximas: $n\%=99,9\%$.

IV. CONCLUSÕES

Os dados de pressão do escoamento a jusante de uma comporta do tipo Tainter invertida instalada em um conduto, tal qual utilizado nos sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação, foram analisados para as pequenas aberturas da comporta como sendo um ressalto hidráulico confinado (CHJ). Esses dados foram comparados com os de ressaltos hidráulicos a superfície livre (FHJ) disponíveis na literatura.

Parece ser válida a analogia entre o escoamento a jusante das válvulas de eclusa para pequenas aberturas e o ressalto hidráulico. Isso contribui muito ao entendimento da dinâmica do escoamento em estudo, pois muitas pesquisas já foram realizadas sobre o ressalto hidráulico suas bases teóricas já estão bem fundamentadas.

O ressalto confinado no conduto apresentou comportamento similar ao ressalto à superfície livre, no entanto gerou coeficientes de pressões médias de mesma ordem de grandeza até submergência de 1,6, maiores flutuações de pressão e igual ordem de grandeza de dissipação de energia.

É possível que nem todos os parâmetros que influenciam as pressões estejam considerados nas formas adimensionais utilizadas, tais como parâmetros de geometria e quantidade de ar misturado ao escoamento, por exemplo.

Esta metodologia pode ser aplicada tanto na fase de projeto ou em obras já existentes que possuam comporta tipo Tainter invertida, permitindo que se prevejam as condições críticas do escoamento e se tome soluções eficientes que venham a reduzir os riscos de problemas durante a vida útil da obra. Este tipo de estudo permite maior agilidade na decisão do tipo de solução a se adotada na fase de projeto e como deverá ser a lei de operação das comportas.

V. CONTINUAÇÃO DA PESQUISA

Estão sendo realizadas as análises das características do escoamento em estudo para as maiores aberturas de comporta e ainda sendo desenvolvidos ensaios de visualização, com o objetivo de se caracterizar o escoamento e poder se definir os parâmetros e as condições críticas no funcionamento deste tipo de dispositivo.

Outra ferramenta que vem sendo aplicada é a simulação numérica do escoamento por meio de técnicas de dinâmica de fluidos computacional. Os dados obtidos nesta pesquisa, no futuro permitirão a calibração de modelos numéricos, e a sua utilização no estudo de soluções para os problemas de cavitação de uma maneira rápida e eficiente.

Ao final da pesquisa, se espera contribuir para o aprimoramento do projeto dos sistemas de enchimento das eclusas de navegação, de forma a reduzir o potencial de cavitação junto às válvulas de enchimento e esvaziamento.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda a equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH que vem se dedicando intensamente a esta pesquisa, em especial a: Leandro, Guilherme, Roberta, Nicolau, Max, Fernanda, Mariana, João, Daiane e Juarez.

Ainda, aos professores do IPH: Edith B. C. Schettini e Paulo K. Souza, e aos amigos do LAHE.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] USACE, UNITED States Army Corps Of Engineers, "Hydraulic Design of Navigation Locks" EM 1110-2-2602. 2006. Disponível em - <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1604/entire.pdf>> Acesso em: 09 agosto 2006.
- [2] <http://www.ahimor.gov.br>, acesso em 08/06/2007.
- [3] <http://images.usace.army.mil/photolib.html>, acesso em 05/09/2006.
- [4] X. Qinqin, "Experimental research results for hydraulic design of high-lift lock culvert valves". XXXI IAHR Congress, Seoul, 2005.
- [5] H. Ussami, "Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação". Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1980.

- [6] S. R. Santos, "Projeto hidráulico de eclusas de alta queda." Tese de livre docência. Vol. 1 e 2. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- [7] H. R. Sharma, "Air-entrainment in high head gated conduits". *Journal of Hydraulic Division*, Nov. 1976.
- [8] F. J. Resch, H. J. Leutheusser, M. Coantic, "Etude de la structure cinématique et dynamique du ressaut hydraulique". *Journal of Hydraulic Research*, 14(4). 1976.
- [9] N. Rajaratnam, "Hydraulic jumps". In: *Advances in Hydrosience*, Chow, V.T. (ed), v. 4, 1967.
- [10] G. Gargano, W. H. Hager, "Undular hydraulic jumps in circular conduits". *Journal of Hydraulic Engineering*. Nov., 2002.
- [11] M. M. Ezzeldin, A. M. Negm, M. I. Attia, "Experimental investigation on the hydraulic jump in sloping rectangular closed conduits". *Alexandria Engineering Journal*, v.39, n.5, Sept, 2000.
- [12] C. D. Smith, W. Chen, "The hydraulic jump in a steeply sloping square conduit". *Journal of Hydraulic Research*. 27(3), 1989.
- [13] C. C. Battiston, "Estudo do escoamento a jusante de válvulas de eclusa, visando à supressão de cavitação sem adição de ar". Plano que qualificação de doutoramento. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 67 p., 2008.
- [14] USACE. 1975. United States Army Corps Of Engineers, "Hydraulic design of lock culverts" EM 1110-2-1610. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/engmanuals/em1110-2-1610/entire.pdf>> Acesso 08/08/2006.
- [15] A. J. Peterka "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators". US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25, Denver, 1974.
- [16] L. A. M. Endres "Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório". Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1990.
- [17] M. G. Marques, "Nouvelle Approche Pour le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge". Tese de Doutorado, Faculte des sciences et génie de la Université Laval, Québec, Canadá, 1995.
- [18]
- [19] A. A. N. Pinheiro, "Acções Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacia de Dissipação de Energia por Ressalto Hidráulico", PhD Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, 1995.
- [20] M. H. Abdul-Khader, K. Elango, "Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump". *Journal of Hydraulic Research*, v. 12, n. 4, p. 469-489, 1974.
- [21] R. A. Lopardo, R. E. Henning, "Efectos de las condiciones de ingreso al resalto sobre el campo de presiones instantâneas". *XII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, São Paulo*, Brasil, v.1 p. 116-127, 1986.
- [22] A. A. A. Mees, "Estudo dos esforços hidrodinâmicos em bacias de dissipação por resalto hidráulico com baixo número Froude". Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 147 p., 2008.
- [23] S. Wu, N. Rajaratnam, "Free jumps, submerged jumps and wall jets". *Journal of Hydraulic Research*, 33(2), 1995.
- [24] E. F. N. Trierweiler, "Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência". Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 194 p., 2006.
- [25] K. Haindl, "Hydraulic Jump in Closed Conduit". *Proc., International Association of Hydraulic Research*. Lisbon, v. 2, 1957.
- [26] J. W. Toso, C. E. Bowers, "Extreme pressures in hydraulic jump stilling basins". *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 114, n. 8, p. 829-843, 1988.
- [27] R. A. Lopardo, C. A. Fattor, M. C. Lopardo, J. M. Casado, "Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basins. Hydraulics of Dams and River Structures". Farhad Yazdandoost & Jalal Attari, A. A. Balkema Publishers, London U.K. ISBN 90 5809 673, Part I, p. 133-138, 2004.