

ESCOAMENTOS A JUSANTE DE COMPORTAS TIPO TAINTER INVERTIDA EM CONDUTOS - PROPOSTA DE ANALOGIA COM O RESSALTO HIDRÁULICO AFOGADO

Gabriela de Azevedo Medronha¹; Aline Saupe Abreu²; Fernanda Oliveira³; Cassius Palauro⁴; Marcelo Giulian Marques⁵; Mariane Kempka⁶; Mauricio Dai Pra^{7}*

Resumo – Comportas do tipo Tainter invertida são encontradas em condutos de eclusas de navegação e tem por função principal o controle das vazões de entrada na câmara de eclusas de navegação de média e alta queda. A operação destes dispositivos, especialmente nas condições iniciais de manobra, quanto grandes desníveis são verificados entre os níveis d'água nos canais de navegação, produz intensos esforços hidrodinâmicos nos condutos, tanto durante o enchimento quanto durante o esvaziamento da câmara da eclusa. Visando estabelecer um método de previsão destes esforços, propõe-se a analogia entre o escoamento a jusante das comportas e um ressalto hidráulico, a partir da identificação de pressões médias e flutuantes, ponderadas por um coeficiente de probabilidade, conforme proposto por Marques (1997) para ressaltos hidráulicos. Este trabalho apresenta uma proposta de avaliação adimensional das pressões médias atuantes junto ao piso do conduto nas condições iniciais de manobra, como forma de estabelecer padrões de comportamento a partir de diferentes condições de operação. A proposta de analogia das pressões médias com o ressalto hidráulico mostrou-se efetiva para as condições mais críticas de operação da comportas.

Palavras-Chave – Pressões Médias; Eclusas de Navegação; Comporta do tipo tainter invertida.

DOWNSTREAM FLOWS OF REVERSE TAINTER GATES IN CONDUITS - ANALOGY WITH THE SUBMERGED HYDRAULIC JUMP

Abstract – The reverse Tainter gates can be found in navigation locks conduits and its main role is controlling the inlet flow into the chambers of average and high fall navigation locks. These devices operation, especially in the initial maneuver conditions, when large unevennesses can be noticed in the navigation channels water levels, produces intense hydrodynamic efforts in the conduits, both while filling and emptying the lock's chamber. Aiming to establish a method of prediction of these efforts, we propose an analogy between the downstream flow and a hydraulic jump, based on the identification of the average and fluctuating pressures, weighted by a coefficient of probability, as proposed by Marques (1997) for hydraulic jumps. This paper presents a proposal of dimensionless assessment of the average pressures acting on the conduits floor during the initial maneuver conditions, in order to establish behavior patterns based on different operation conditions. The proposed analogy between the average pressures and the hydraulic jump proved to be effective for the most critical conditions of the floodgates operation.

Keywords – Average pressures; Navigation locks; Reverse tainter gates.

¹Eng. Química, bolsista DTI da UFPel, ggabymed@yahoo.com.br

²Discente do curso de Graduação em Engenharia Hídrica da UFPel, alsaupe@gmail.com

³Discente do curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da UFPel, civil.fernanda@gmail.com

⁴Engenheiro Civil, FAURGS, cassiuspalauro@gmail.com

⁵Docente do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, mmarques@iph.ufrgs.br

⁶Discente do curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS, kempka.mariane@gmail.com

⁷Docente do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da UFPel - mauricio.daipra@ufpel.edu.br

INTRODUÇÃO

Devido a extensão da rede hidroviária do país, com cerca de 42 mil quilômetros de rios navegáveis (ANTAQ, 2008), e visando a utilização desta rede hidroviária, torna-se necessária a implantação de estruturas hidráulicas específicas, tais como as eclusas de navegação, que proporcionam a transposição de embarcações através de desníveis e barreiras topográficas naturais e/ou artificiais (ALFREDINI, 2005).

Para melhor dimensionar, visando aspectos de segurança à embarcação, à tripulação e à aspectos relacionados à integridade da estrutura, assim como buscar a minimização de custos financeiros na construção, operação e manutenção destas estruturas hidráulicas, torna-se necessário a elaboração de estudos em modelos experimentais adequados a cada projeto em análise. Através dos modelos físicos hidráulicos, são analisadas as grandezas físicas envolvidas principalmente no que diz respeito aos esforços atuantes na estrutura, provenientes do comportamento hidrodinâmico do escoamento.

Importante salientar que as etapas iniciais do enchimento e do esvaziamento das câmaras de eclusas de média e alta queda, representadas por pequenas aberturas e altas vazões, são aquelas em que os esforços hidráulicos atuantes na estrutura são mais críticos, sendo que para estas condições hidráulicas é que as estruturas devem ser projetadas com cuidados adicionais visando a prevenção contra erosão por desgaste e/ou por ação de cavitação.

Este trabalho apresenta, então, uma proposta de caracterização das pressões médias atuantes nos aquedutos de eclusas de navegação, especialmente a jusante da comporta de controle de vazões. Propõe-se, aqui, a adoção de parâmetros adimensionais idênticos àqueles utilizados em ressaltos hidráulicos submersos por Marques (1997), seguindo a proposta de Battiston *et al.* (2009), que considera que o escoamento a jusante de comportas pode ser caracterizado de forma análoga ao que ocorre em ressaltos hidráulicos submersos. Não são abordados neste trabalho os padrões flutuantes das pressões, bem como os respectivos coeficientes de ponderação associados a distintas probabilidades de não excedência, etapas que serão desenvolvidas em trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As eclusas de navegação são mecanismos que têm a função de promover, de forma segura, a transposição de desníveis gerados por barreiras naturais ou de ação antrópica (barramentos), pelas embarcações (BATTISTON, 2008). Esses sistemas utilizam apenas a força da gravidade para o seu funcionamento, onde o enchimento e o esvaziamento são feitos pelo princípio dos vasos comunicantes (PALAURO, 2012).

A operação de 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 associados e as soluções possíveis para evitar que ocorram danos às obras hidráulicas.

Com relação às comportas de controle de vazão do sistema de enchimento e esvaziamento, vários tipos de comportas foram utilizados em eclusas. Devido ao grande sucesso técnico e econômico que estava, à época, sendo obtido com a aplicação de comportas segmento (“Tainter gates”) em descarregadores de superfície, estas comportas passaram a ser aplicadas nas eclusas a partir de 1930 (Figura. 1). Porém, nas eclusas, as comportas segmento são instaladas na posição invertida para evitar a entrada descontrolada de ar no sistema (USACE, 1975 e SANTOS, 1998).

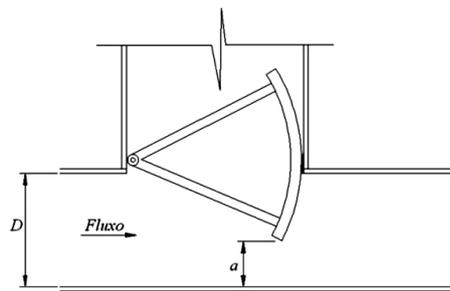


Figura 1 - Esquema de instalação da comporta tipo Tainter invertida

A caracterização dos esforços hidráulicos provenientes da operação da comporta, que se manifestam tanto na base quanto no teto dos aquedutos vem sendo estudado a partir de modelagem matemática do escoamento (SANTOS, 2012) e em paralelo a partir de modelagem física, como nos trabalhos de Kempka (2011), Palauro (2012) e Battiston (2008), desenvolvidos no âmbito do projeto de P&D ANEEL "Análise do Comportamento Hidráulico dos Sistemas de Enchimento e Esgotamento de Eclusas de Navegação".

Os fenômenos altamente dissipativos a partir de componentes dinâmicas de pressões e velocidades, bem como a região de recirculação que se verifica a jusante da comporta, se assemelham ao que ocorre em ressaltos hidráulicos submersos, quando da ocorrência do rolo. Assim, os parâmetros comumente utilizados no ressalto submerso (figura 2) são aqui adaptados para as condições do escoamento a jusante das comportas em condutos.

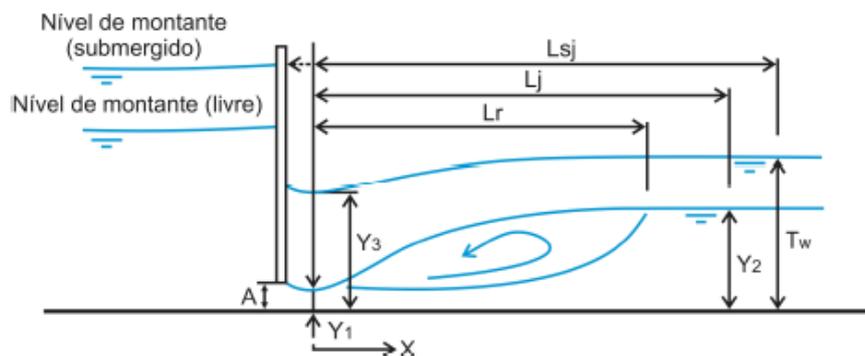


Figura 2 - Simbologia do Ressalto Hidráulico - Trierweiller (2006) – adaptado

Segundo Marques *et al.* (1997) é possível a adoção de parâmetros adimensionais para avaliar os esforços de pressão atuantes junto ao piso de bacias de dissipação, associando as pressões médias com a altura conjugada rápida e as flutuações de pressão com a perda de carga ao longo do ressalto.

As pressões médias no ressalto hidráulico submerso foram adimensionalizadas a partir das equações 1, 2 e 3, conforme sugestões de Marques *et al.* (1999).

$$\Psi = \frac{P_x - y_1}{y_2 - y_1} * \frac{1}{S} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{X}{y_2 - y_1} \quad (2)$$

$$S = \frac{T_w}{y_2} \quad (3)$$

Sendo:

Ψ = pressão média adimensionalizada;

P_x = pressão média na posição X;

y_1 = altura de água na seção de entrada do ressalto hidráulico;

y_2 = altura de água na seção de saída do ressalto hidráulico;

S = grau de submergência;

Γ = posição adimensionalizada;

X = posição da tomada de pressão em relação ao início do ressalto; e

T_w = é a altura do escoamento a jusante do ressalto hidráulico.

A proposta da avaliação do escoamento a jusante de comportas em condutos enquanto analogia ao ressalto hidráulico afogado foi feita inicialmente por Haindl (1957). Battiston *et al.* (2009), seguindo esta mesma linha de investigação, traz à tona os grupos adimensionais propostos por Marques (1997) utilizados no ressalto hidráulico submergido, conforme figura 3.

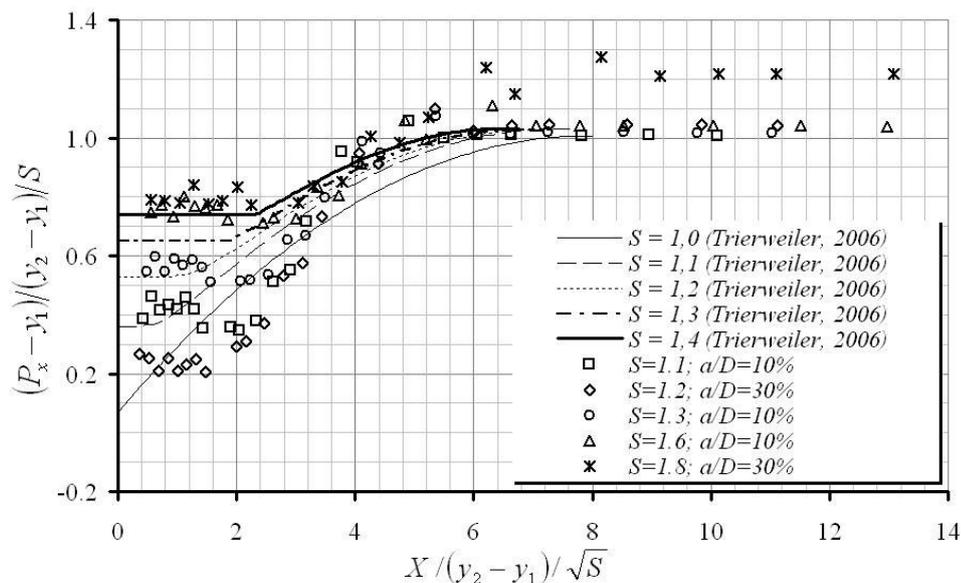


Figura 3 - Comparação das pressões médias adimensionalizadas (Fonte: Battiston *et al.* (2009))

METODOLOGIA

Para esta pesquisa foi utilizado um modelo experimental instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS, sendo a seção de testes principal composta de um conduto onde está instalado a comporta e onde foram realizadas as medições. Esse conduto apresenta seção quadrada de 25cm x 25cm e comprimento total de 8,9m. A comporta instalada é do tipo Tainter invertida. Este sistema foi instalado ao longo de uma linha de recalque com reservatório a jusante com a função de manter o conduto afogado.

As pressões instantâneas foram medidas em posições distribuídas ao longo do teto e da base do conduto. Tanto na base quanto no teto totalizam 17 transdutores a jusante da comporta

(Figura 4). Próximo à comporta os transdutores de pressão foram posicionados com espaçamento de 5cm entre eles. Conforme o aumento da distância a partir da comporta, o espaçamento entre os transdutores passava para 10cm, 20cm e 40cm.



Figura 4 - Transmissores de pressão na base e no teto do conduto (Fonte: Kempka, 2011)

Durante os testes, além das medições de pressões flutuantes com transdutores, foram efetuadas medições de pressões médias com piezometria convencional, além do controle da abertura da comporta com uma régua e a vazão por meio de um medidor eletromagnético.

Os ensaios foram realizados para diferentes aberturas de comporta variáveis entre 5 e 100%. Na Tabela 1 estão apresentadas apenas as condições de ensaio utilizadas neste trabalho, características de números de Froude superiores a 4,0.

Tabela 1 - Ensaios Realizados

Abertura	Vazão (l/s)							
	14	16	18	22	28	32	40	50
5%	X	X	X					
10%	X	X	X	X	X	X	-	-
15%	X	X	X	X	X	X	X	-
20%	-	-	X	X	X	X	X	-
25%	-	-	-	-	X	X	X	X
30%	-	-	-	-	-	-	X	-
40%	-	-	-	-	-	-	X	-

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui apresentados são aqueles representativos apenas das condições mais críticas de operação, notadamente aquelas condições hidráulicas de maior vazão e menores aberturas, conduzindo a números de Froude superiores a 4,0. Tendo em vista a analogia que se estabelece aqui entre o escoamento a jusante da comporta e o ressalto hidráulico submergido, serão apresentados apenas os resultados experimentais verificados junto à base do conduto.

De forma geral, os resultados experimentais, independente da abertura da comporta, apresentam valores decrescentes a partir da comporta até uma região de mínima pressão média. A partir desta região, as pressões crescem atingindo uma condição estável quando os efeitos da

comporta deixam de se manifestar. A partir deste ponto, a porção de dissipação de energia proporcionada pela recirculação que se verifica a jusante da comporta se encerra.

No Figura 4 pode-se observar um comportamento semelhante entre as diferentes vazões e suas respectivas pressões médias. Percebe-se que a partir da posição 2,0 as pressões médias se estabilizam. O trecho onde se verifica a maior dispersão encontra-se na região próxima à ocorrência da "vena contracta", local onde se verificam os mínimos valores médios de pressão.

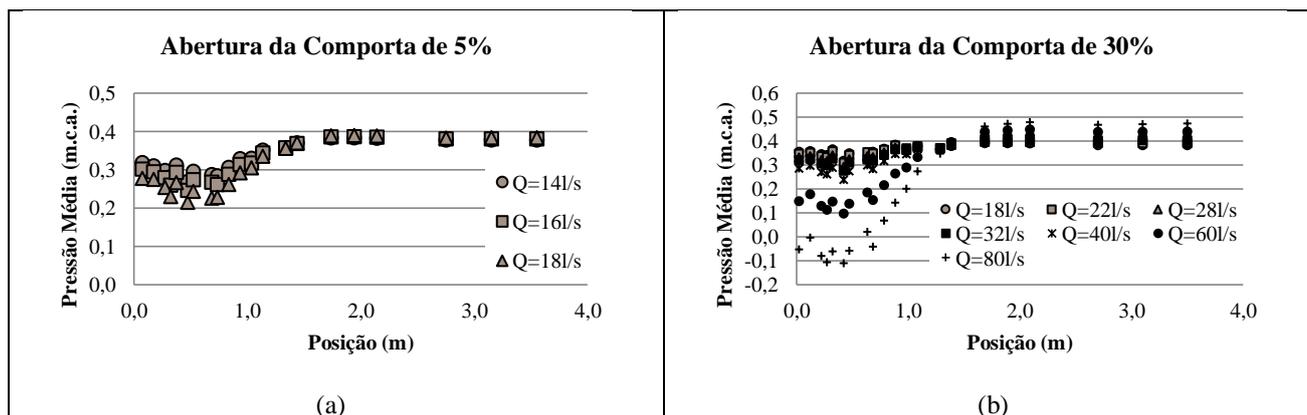


Figura 5 - Relação entre a pressão média e a posição a jusante da comporta com aberturas de (a) 5% e (b) 30%.

A analogia com o ressalto hidráulico submerso é conduzido, então, a partir da adimensionalização das pressões médias, segundo as equações 1 e 2, considerando o fator de submergência, segundo equação 3. Para tanto foram feitas as equivalências apresentadas na tabela 2 entre as características dos escoamentos a jusante da comporta e no ressalto hidráulico submerso.

Tabela 2 – Características dos escoamento

	Ressalto Hidráulico	Escoamento a jusante da comporta
y_1	Altura conjugada rápida	Altura do escoamento na seção contraída
x	Posição relativa ao início do ressalto	Posição relativa à posição de mínima pressão média
T_w	Altura d'água a jusante do ressalto	Altura d'água no reservatório de jusante

Para o cálculo da altura do escoamento (y_2), representativa da altura do escoamento no interior do conduto caso o mesmo não estivesse na condição afogada foi utilizada relação entre as alturas conjugadas proposta por Belanger, conforme equação 4.

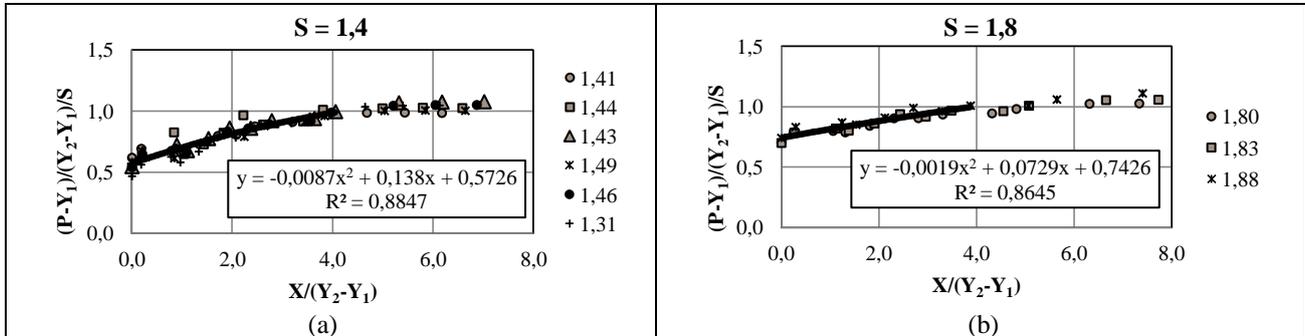
$$y_2 = \frac{1}{2} * y_1 * \sqrt{(1 + 8 * Fr^2)} - 1 \quad (4)$$

Onde:

$y_1 = a.Cc$, sendo "a" a abertura da comporta e "Cc" o coeficiente de contração (Kempka, 2011); Fr_1 é o número de Froude calculado a partir de y_1 .

Para melhor discretizar a situação de afogamento os resultados experimentais foram então agrupados em classes de submergência variáveis a cada 0,2 unidades, desde $S = 1,0$ até $S = 2,4$, proporcionando a geração de curvas de ajustes típicas do comportamento de cada uma das submergências. Como forma de exemplificar o agrupamento proposto dos dados de acordo com as submergências, apresenta-se a figura 6, no qual é possível constatar um comportamento crescente

até a posição adimensional 4,0. A partir desta posição as pressões médias adimensionais se mantêm constantes e em torno do valor unitário.



Figuras 6 – Dados adimensionalizados e agrupados de acordo com a submergência (a) S=1,4 e (b) S=1,8.

Através das curvas de ajuste quadráticas de cada uma das submergências foram determinados os coeficientes de ajuste “A”, “B” e “C” apresentados na figura 7. Observa-se um crescimento acentuado no coeficiente “A” de ajuste tendendo a assumir um valor constante como resposta as mudanças no fator “S”, em torno de uma posição assintótica em torno do valor zero, indicando que para submergências superiores a 2,0, os adimensionais de pressão média tendem a ter uma comportamento linear.

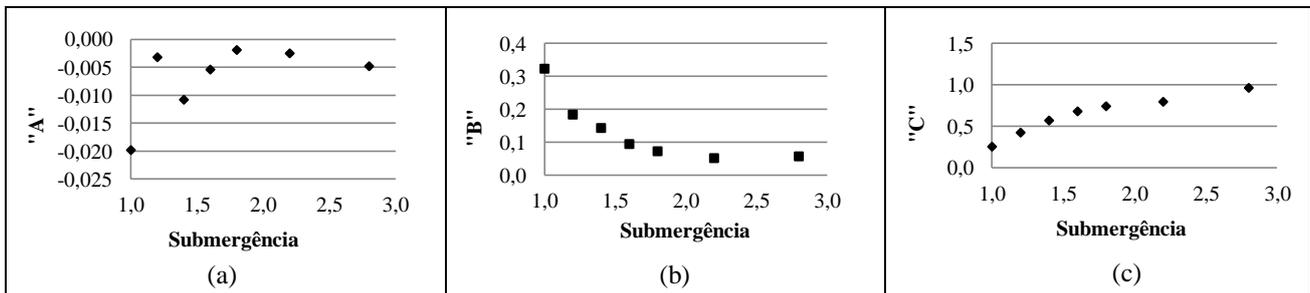


Figura 7 - Coeficientes de ajustes “a”, “b” e “c” das curvas de submergências.

Avaliando os coeficientes "B" da figura 7, constata-se um comportamento de redução do mesmo com o aumento da submergência, tendendo a apresentar um valor constante em torno de zero para submergências superiores a 2,0. Isso indica que para submergências maiores, o comportamento do adimensional das pressões médias tende a ser um valor constante, característico apenas da posição ao longo do conduto. Em relação ao termo independente, coeficiente “C”, verifica-se um crescimento contínuo neste parâmetro com o aumento dos valores de submergência tendendo assintoticamente ao valor unitário.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia de previsão as pressões médias verificadas a jusante de comportas tipo segmento invertida, desde a posição de mínima pressão média, junto à ocorrência da vena contracta, até a posição onde as pressões médias já não sofrem mais os efeitos da abertura da comporta.

Verificou-se que as pressões médias quando adimensionalizadas por parâmetros semelhantes aqueles utilizados em ressalto hidráulicos submersos agrupam-se de forma dependente apenas

com o grau de submersão do escoamento. Com isso foi possível identificar que as pressões médias adimensionalizadas apresentam crescimento a partir da posição de ocorrência da vena contracta até a posição adimensional 4,0, a partir da qual as mesmas permanecem constantes. Esta posição adimensional 4,0, nos estudos conduzidos no ressalto hidráulico, corresponde àquela posição onde se verifica a tendência de descolamento do escoamento junto ao fundo (Marques *et al.* 1997). Como no caso dos condutos há o confinamento pela parede superior, tal efeito é minimizado, ou mesmo anulado, tendendo a estabilização das pressões médias de forma mais rápida do que o verificado nos ressalto hidráulicos.

Salienta-se, novamente, que os resultados aqui apresentados referem-se apenas a condições hidráulicas características que números de Froude maiores do que 4,0, o que representa, do ponto de vista de escoamentos a superfície livre, ressalto hidráulicos estáveis ou fortes.

AGRADECIMENTOS

À FINEP, pelo auxílio financeiro através do projeto “Análise dos Esforços Hidrodinâmicos a Jusante de Válvulas de Enchimento e Esvaziamento de Eclusas de Navegação” no âmbito do CT-Aquaviário, ao CNPq e à Eletrobrás-Furnas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFREDINI, P. (2005). *Obras e Gestão de Portos e Costas*. Edgard Blücher. São Paulo. 688 p.
- ANTAQ (2008), Agência Nacional de Transportes Aquaviários. *Panorama Aquaviário*. Volume 2.
- BATTISTON, C. C (2008). Estudo de escoamento a jusante de válvulas de eclusa, visando à supressão de cavitação sem adição de ar. Projeto de Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre.
- BATTISTON, C. C.; SCHETTINI, E. B. C.; CANELLAS, A. V. B.; MARQUES, M. G. (2009). Eclusas de Navegação: caracterização hidráulica do escoamento a jusante das válvulas de enchimento/esvaziamento. In *Anais Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande - MS.
- HAINDL, K.(1957) Hydraulic Jump in Closed Conduit. Proc., *International Association Of Hydraulic Research*. Lisbon, Vol. 2..
- KEMPKA, M. (2011). Determinação das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida: aplicação em eclusas de navegação. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, UFRGS.
- MARQUES, M.G., DRAPEAU, J., VERRETTE, J.L. (1997) Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. In *Anais XVII Congresso Latino Americano de Hidráulica*, Guayaquil, Equador.
- MARQUES, M.G.; ALMEIDA, F.M.; ENDRES, L.A.M. (1999). Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In *Anais Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte - MG.
- PALAURO, C. (2012). Análise das Pressões Mínimas a Jusante de Comporta Tipo Segmento Invertida em Eclusas de Navegação. Dissertação de Mestrado. UFRGS.
- TRIERWEILER, E. F. N.(2006). Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submersão, Dissertação de Mestrado. UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul..
- SANTOS, S. R.(1998). Projeto Hidráulico de Eclusas de Alta Queda. 1998. 225 f. Texto (Título de Professor Livre Docente) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SANTOS, J. B. V. (2012). Proposta de Alteração Geométrica e Análise de Escoamentos a Jusante de Válvulas Eclusas De Navegação. Dissertação de Mestrado. UNISINOS. 61p.
- USACE, UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. (1975). Hydraulic design of lock culverts EM 1110-2-1610.