

POSIÇÃO DE INÍCIO DO RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE VERTEDOUROS - ESTUDO EXPERIMENTAL

*Juliano Pacheco dos Santos¹; William Caetano Santos¹; Fernanda Fernandes Martins de Oliveira²;
Eder Daniel Teixeira³; Rafael André Wiest⁴; Marcelo Giulian Marques³; Mauricio Dai Prá^{5*}*

Resumo – Os dissipadores de energia tipo bacia de dissipação são projetados de forma que o ressalto hidráulico fique confinado na estrutura hidráulica. Para que isso ocorra é necessário conduzir o projeto hidráulico (definição de cotas e soleiras terminais) de forma a garantir a submersão do ressalto mesmo em condição de vazões extremas. A determinação do início do ressalto hidráulico passa a ter importância destacada uma vez que o mesmo se forma ainda no paramento de jusante dos vertedouros, em regiões onde já poderão estar presentes, por exemplo, pilares e ranhuras de stop-logs. Este trabalho apresenta propostas de determinação desta posição de início do ressalto obtida a partir de estudos hidráulicos em modelos físicos bidimensionais de vertedouros operando com e sem comportas. As propostas apresentadas permitiram agrupar diferentes condições hidráulicas (vazões e níveis de jusante) apresentando, contudo, variação para o caso de operação com e sem comportas.

Palavras-Chave – Estruturas hidráulicas, ressalto hidráulico, bacias de dissipação.

POSITION OF BEGINNING OF THE HYDRAULIC JUMP – EXPERIMENTAL STUDY

Abstract – The stilling basin energy dissipators are designed in way to maintain the hydraulic jump confined at the hydraulic structure. For this to occur is necessary to conduct the hydraulic project (definition of elevation and end-sills) in way to ensure the submergence of the hydraulic jump even in condition of extreme flow. The determination of the beginning of the hydraulic jump becomes more important as it develops in the vestment downstream of spillways, in regions where are present, for example, pillars and slots of stop-logs. The present paper proposes ways to determinate the position of the beginning of the hydraulic jump obtained from hydraulic studies in two-dimensional physical models of spillways operating with or without gates. The proposals made it possible to group different hydraulic conditions (flows and downstream levels) presenting, however, variations in case of operation with or without gates.

Keywords – hydraulic structures, hydraulic jump, stilling basin.

¹ Discente do curso de Graduação em Engenharia Hídrica da UFPel - emaildojuliano1@gmail.com; eng.william.santos@gmail.com

² Discente do curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da UFPel - civil.fernanda@gmail.com

³ Docente do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS - edtengenharia@yahoo.com.br; mmarques@iph.ufrgs.br

⁴ Eng. Civil da Companhia Estadual de Energia Elétrica CEEE - rafael.wiest@ceee.com.br

⁵ Docente do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da UFPel - mauricio.daipra@ufpel.edu.br

INTRODUÇÃO

A utilização do ressalto hidráulico no âmbito dos sistemas de geração de energia refere-se principalmente à dissipação de energia na base de barragens, uma vez que há um incremento na energia do escoamento natural resultante das mesmas. As estruturas de segurança (dentre elas, os vertedouros) e os próprios arranjos gerais das obras de barragens, independente de suas finalidades, são bastante variados. Estas condições diversas levam à criação de vários tipos de escoamentos a jusante dos vertedouros, que, de maneira geral, apresentam características peculiares para cada caso.

Grande parte dos estudos relativos ao ressalto refere-se ao fenômeno ocasionado em canais planos. Todavia, um número significativo de estruturas não apresenta o comportamento característico deste tipo de escoamento, podendo ocorrer variações tanto das características na porção mais a montante do ressalto (ressalto a jusante de comportas e ressalto a jusante de vertedouros) como na parte a jusante do ressalto (ressalto livre e submergido), além das próprias condições geométricas e de concepção das estruturas de dissipação. Normalmente, as condições estabelecidas a jusante de vertedouros ocasionam condições de afogamento da estrutura, ressaltando o interesse neste tipo de situação.

Os critérios mais aceitos de projeto de estruturas de dissipação por ressalto hidráulico consideram os esforços resultantes do ressalto livre como a pior situação à qual a obra será submetida em sua vida útil. Entretanto, grande parte das estruturas vertentes raramente apresenta tais condições quando em operação normal, de forma que o escoamento formado a jusante de vertedouros na maior parte das vezes apresenta algum grau de submergência.

Este cenário pode indicar a necessidade de avaliação desses critérios, uma vez que o cenário previsto em projeto dificilmente acontece de fato. Assim, avaliando as pressões sobre a estrutura no caso de diversos graus de submergência do ressalto, pode-se avaliar a viabilidade de otimização do projeto, no que diz respeito a extensão da bacia, reduzindo assim os custos de implantação, sem provocar redução na confiabilidade e segurança da estrutura.

Este trabalho propõe a avaliação do ressalto hidráulico submergido, especificamente quanto ao estabelecimento quantitativo da posição de início do ressalto sobre a calha do vertedouro, a partir do grau de submergência do escoamento imposto pelas condicionantes hidráulicas de jusante e de geometria da bacia de dissipação. Os resultados aqui apresentados foram obtidos a partir de investigação experimental em modelos físicos hidráulicos bidimensionais de vertedouros sem controle de comportas e referem-se a alguns dos resultados obtidos no trabalho de Dai Prá (2011).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No que tange à formação do ressalto hidráulico a jusante de canais de forte declividade, Hager (1988) propõe uma classificação dependente do seu grau de submergência e da posição em que se forma, conforme pode ser visto na Figura 1. Ressaltos tipo A formam-se no início da bacia de dissipação, já os ressaltos tipos B, C e D, têm início junto ao paramento do vertedor.

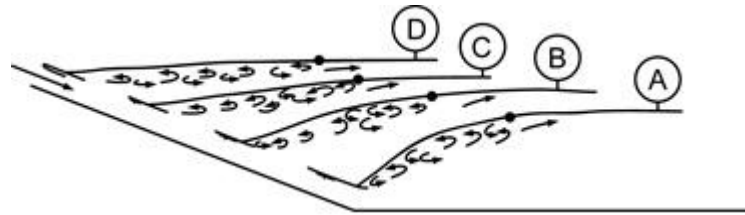


Figura 1 – Classificação do ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade.
 Fonte: Hager (1988)

Especificamente quanto ao ressalto tipo B, abordado neste trabalho, o mesmo ocorre à medida que há um incremento da lâmina d'água a jusante, de forma que o trecho inclinado a montante da bacia passa a ser parte da estrutura de dissipação. Isso se dá, em termos quantitativos, quando o nível d'água a jusante (T_w) supera a profundidade lenta do ressalto (Y_2).

O número de estudos realizados sobre o ressalto afogado é reduzido se comparado ao número de trabalhos que estudam ressalto sobre canais horizontais. Podem-se destacar principalmente os estudos apresentados por Elevatorski (1959), que resume as características observadas em ressaltos submersos. Rajaratnam (1967) faz uma revisão do assunto de forma genérica, englobando ainda os demais tipos de ressaltos sobre canais inclinados. Peterka (1974) faz uma abordagem resumida desse tipo de ressalto. De forma geral, os diversos autores enfocam as características externas do ressalto, através do estabelecimento do perfil da linha d'água e parâmetros como o comprimento do ressalto e as alturas conjugadas.

A avaliação da posição de início do ressalto tem sido abordada na bibliografia, via de regra, correlacionada com as profundidades conjugadas. Assim, além da consagrada relação das alturas conjugadas de Belanger (1828), destacam-se as propostas de Hager (1988) (Equação 1) e Ohtsu e Yasuda (1994) (Equação 2) por terem sido desenvolvidas a partir de estudos em ressaltos hidráulicos tipos A e B, seguindo a delimitação experimental deste trabalho.

$$\frac{T_w}{Y_1 \cdot \cos(\theta)} = 23,5 \cdot \left(1 + \frac{3}{2} E\right)^{-2} + \frac{\sqrt{2}(Fr_1 - 3)}{th\left(\frac{5}{2} E\right)}, \text{ onde } E = \frac{h_2 - Z_1}{h_2} \quad (1)$$

$$\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)^3 - \left\{2.Fr_1^2 + 1 - S_f\right\} \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) + 2.Fr_1^2 = 0, \text{ onde } S_f = 0,12(Fr_1 - 1)^2 \quad (2)$$

Onde:

θ = declividade do canal a montante do trecho plano sobre o qual ocorre a formação do ressalto hidráulico;

Z_1 = desnível entre a cota da estrutura de descarga onde se identifica o início do ressalto hidráulico e a cota de fundo da bacia de dissipação;

Y_1 = altura conjugada rápida do ressalto hidráulico;

Y_2 = altura conjugada lenta do ressalto hidráulico;

T_w = altura de água do escoamento a jusante do ressalto submerso; e

Fr_1 = número de Froude na posição de início do ressalto.

Ohtsu e Yasuda (1991) apresentam relações para as alturas conjugadas a jusante de um canal inclinado, sem um raio de concordância com o canal horizontal, para inclinações da estrutura de montante variando de 0° a 60° e uma faixa de número de Froude entre 6,0 e 14,0 (equação 3).

$$\frac{l}{Y_2} = \left[\frac{2,3}{(\tan \theta)^{0,73}} - 0,8 \right] \left(\frac{T_w}{Y_2} - 1 \right) \quad (3)$$

Onde:

l = comprimento horizontal entre a seção de início do ressalto e o início do canal horizontal à jusante.

Wiest (2008) apresenta uma análise experimental a partir de dados obtidos em modelos físicos para a determinação dos parâmetros característicos do ressalto desenvolvido, entre eles a altura rápida e lenta e o número de Froude (Fr_1) no início do ressalto, possibilitando o cálculo do grau de submersão (S) a que a estrutura estava submetida. Após analisar os parâmetros estabelecidos foi possível estabelecer relações adimensionais para representar o comportamento do ponto de início do ressalto submerso. A equação 4 foi a relação que melhor descreveu o comportamento do ressalto, relacionando a posição vertical de início do ressalto (Z_{calc}) e o grau de submersão do escoamento. A Figura 2 apresenta os resultados experimentais do autor.

$$\frac{Z_{calc}}{hc} = [Fr_1 (S - 1)]^{0,61} \quad (4)$$

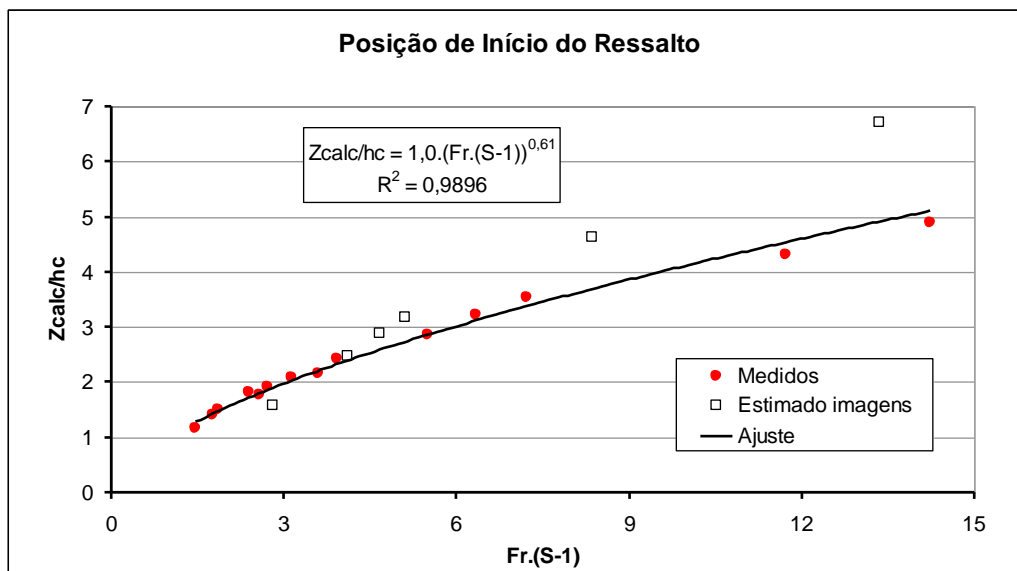


Figura 2 - Posição de início do ressalto (Wiest, 2008).

METODOLOGIA

Os estudos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de Furnas (LAHE/FURNAS), situado em Jacarepaguá, no Rio de Janeiro/RJ, tendo como ponto de partida um modelo físico bidimensional sobre o qual foram propostas algumas alterações no sentido de configurar uma soleira vertente sem a presença de comportas e pilares.

Foram alteradas, também, as condições a jusante da bacia de dissipação original a partir da retirada da soleira terminal e do rebaixamento das cotas a jusante, mantendo toda a estrutura após a curva de concordância vertical em uma única cota idêntica à cota original da bacia de dissipação. Isso permitiu a imposição em modelo físico, além do ressalto hidráulico submerso (Tipo B), o ressalto hidráulico livre (Tipo A).

A seção transversal onde se inicia o ressalto hidráulico foi definida visualmente a partir da identificação da posição média em torno da qual a instabilidade natural da posição de início do ressalto flutuava. Essa instabilidade ficou evidenciada especialmente nos escoamentos com menores números de Froude na entrada do ressalto, tanto longitudinalmente quanto transversalmente ao sentido do fluxo, conferindo a essa medição também um grau de subjetividade.

Uma vez estabelecida essa seção transversal, efetuou-se a medição da profundidade do escoamento, adotando uma ponta linimétrica, fixada sobre um dispositivo de medições metálico, com movimentação longitudinal, a partir de um sistema de rodízios sobre trilhos.

Tal procedimento foi efetuado tanto para as condições de ensaio com a imposição do ressalto hidráulico tipo A como para ressaltos hidráulicos submersos, quando, novamente, identificou-se instabilidade na posição de início do ressalto, contudo de forma bastante atenuada. Essa situação tornou-se cada vez mais evidente com o aumento do grau de submersão imposto.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Praticamente inexitem propostas que avaliam especificamente a posição de início do ressalto hidráulico submerso a jusante de vertedouros, sendo identificada apenas a proposta de Wiest (2008), que propõe uma relação adimensional para avaliar essa posição. Na Figura 3 observa-se a comparação entre a equação proposta pelo autor e os dados experimentais de Dai Prá (2011), aqui apresentados.

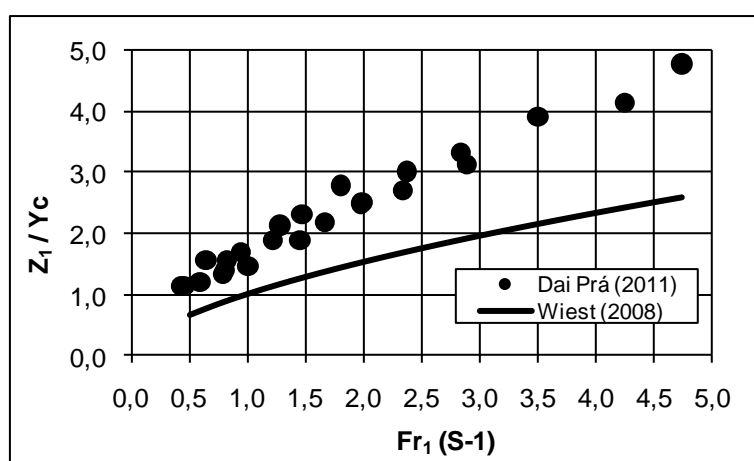


Figura 3 – Análise comparativa da posição de início do ressalto hidráulico afogado.

Percebe-se, claramente, que não existe concordância entre os resultados apresentados, apesar dos mesmos apresentarem mesma tendência de comportamento. Salienta-se, contudo, que as condições de ensaio propostas neste trabalho diferem daquelas utilizadas por Wiest (2008), as quais consistiam de um vertedouro controlado por comportas, aumentando a energia disponível a

montante. Também diferia quanto à geometria a jusante da bacia de dissipação, com uma soleira terminal e a jusante desta uma rampa com declividade de 4:1 até atingir o terreno natural, alterando as condições de afogamento do ressalto hidráulico. Acrescenta-se, ainda, o fato de que nos estudos experimentais de Wiest (2008) o ressalto submerso apresentava sua posição de início em meio a presença dos pilares que individualizavam os vãos das comportas.

Independente dessas diferenças observadas cabe salientar aqui o mérito da adimensionalização proposta de Wiest (2008), a qual agrupou os dados experimentais apresentados no presente estudo de forma consistente e com dispersão reduzida.

Cabe salientar que a definição da posição do início do ressalto hidráulico se faz necessária tendo em vista os parâmetros considerados ao longo das adimensionalizações conduzidas nos processos de avaliação dos esforços médios, flutuantes e extremos junto ao piso de bacias de dissipação. Dessa forma, para que o adimensional da posição (Γ_i) seja definido, faz-se necessária a identificação da posição do início do ressalto hidráulico afogado visando a sua correlação com as demais posições avaliadas ao longo da bacia de dissipação (X).

A partir dessas considerações, conduziu-se a adimensionalização das posições de início do ressalto hidráulico (P_i), tomadas em planta, e contadas positivamente, para montante, a partir do ponto de tangência entre a curva de concordância vertical e a bacia de dissipação. Correlacionou-se essa posição com o comprimento do ressalto hidráulico tipo A, representado pelas profundidades conjugadas (Y_1 e Y_2), conforme equação 5.

Avaliou-se, também, o afogamento do ressalto hidráulico a partir da diferença entre o nível d'água a jusante do mesmo (T_w) e a sua profundidade conjugada lenta, adimensionalizadas pela profundidade do escoamento na entrada do ressalto hidráulico livre, conforme equação 6.

$$\Gamma_i = \frac{P_i}{Y_2 - Y_1} \quad (5)$$

$$S_R = \frac{T_w - Y_2}{Y_1} \quad (6)$$

A Figura 4 apresenta os dados experimentais deste estudo, comparando-os com aqueles obtidos por Eletrobrás-Furnas, a partir dos quais se propõe o ajuste da equação 7 como representativa da posição de início do ressalto hidráulico.

$$S_R = 0,5442 (\Gamma_i)^{2,7035} \quad (7)$$

Pela análise da Figura 4, observa-se que as posições de início do ressalto seguem uma linha de tendência bem definida e apresenta-se como função apenas do nível d'água verificado a jusante do ressalto hidráulico afogado e das profundidades características do ressalto hidráulico tipo A.

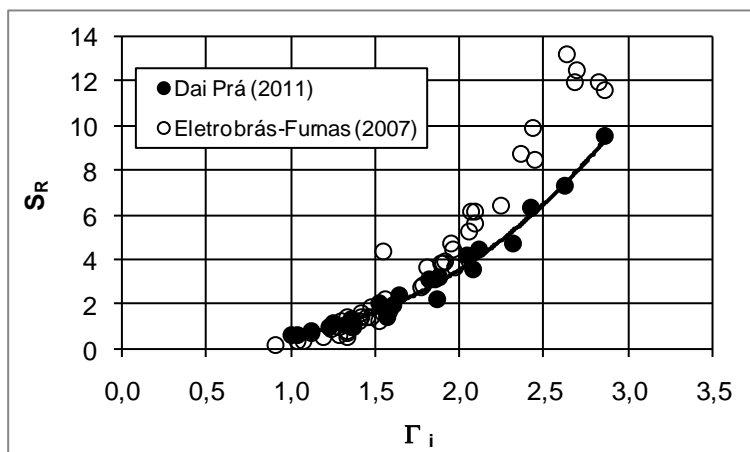


Figura 4 – Posição de início do ressalto hidráulico afogado (tipo B).

Na comparação entre os resultados deste estudo e aqueles apresentados por Eletrobrás-Furnas (2007), observa-se alguma diferença de tendência dos resultados experimentais, especialmente para posições adimensionais superiores a 2,0, ou ainda, em direção aos maiores afogamentos. Essa diferença pode ser atribuída à presença de pilares na estrutura avaliada por Eletrobrás-Furnas (2007).

Essa diferença pode ser atribuída às características dos modelos físicos utilizados nos estudos de Eletrobrás-Furnas (2007), já que os mesmos consistiam de vertedouros controlados por comportas e com piso a jusante da bacia de dissipação em cota superior à mesma. Devido a essas características geométricas, a imposição do ressalto hidráulico tipo A não foi possível nos estudos de Eletrobrás-Furnas (2007), impedindo a identificação experimental das profundidades conjugadas do ressalto hidráulico tipo A. Com isso foi necessária a realização de estimativa analítica das mesmas, a partir da consideração das perdas de carga entre o nível d'água a montante e a seção imediatamente a jusante da curva de concordância vertical.

Cabe salientar que os dados experimentais de Eletrobrás-Furnas (2007), na Figura 4, foram adquiridos a partir de modelos físicos de estruturas descarregadoras semelhantes, mas em diferentes escalas (1:100, 1:50 e 1:32), e com mesmo raio de concordância vertical, quando avaliadas as dimensões do protótipo.

CONCLUSÕES

A proposta apresentada neste trabalho procura estabelecer a caracterização da posição de início de ressalto a partir de condicionantes hidráulicas de operação de vertedouros seguidos de bacias de dissipação.

Com o estabelecimento da posição de início do ressalto, conforme equação 7, pode-se avaliar a carga hidráulica disponível a montante desse ponto e, conseqüentemente, estimar a profundidade do escoamento na seção de entrada do ressalto hidráulico submerso (tipo B).

Cabe salientar que, independente dos parâmetros adimensionais utilizados neste estudo, tais parâmetros hidráulicos têm importância do ponto de vista do projeto do sistema extravasor, uma vez que os mesmos condicionam, por exemplo, a altura dos pilares do vertedouro, o posicionamento dos

munhões das comportas ou mesmo a altura dos muros guias do vertedouro. Além disso, os intensos esforços hidrodinâmicos verificados nas posições iniciais do ressalto hidráulico podem estar ocorrendo em regiões onde, por exemplo, estejam localizados pilares do vertedouro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LAHE/FURNAS pela disponibilidade das instalações para a condução deste trabalho, bem como ao IPH/UFRGS, ao CNPq e à FINEP que apoiaram este projeto a partir de concessão de bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- Bélanger, J. B. (1828). *Essa sur La Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes*. Paris, Chez Carilian-Goeury, 46p.
- Dai Prá, M. (2011). *Uma abordagem para a determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por Ressalto Hidráulico*. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 208p.
- Elevatorsky, E. A. (1959). *Hydraulic Energy Dissipators*. New-York, McGraw-Hill, 214p.
- ELETROBRÁS-FURNAS (2007). *Análise Geral dos Dados e Diretrizes para Projeto. Relatório de Produto de Pesquisa - P&D Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico*. Rio de Janeiro, 70p.
- Hager, W. H. (1988). B-Jump in Sloping Channel. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 26, n. 5, 539-558.
- Hager, W. H. (1992). *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 289 p.
- Hager, W. H.; Bremen, R.; Kawagoshi, N. (1990). Classical Hydraulic Jump: Length of Roller. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 28, n° 5, 591-605.
- Ohtsu, I.; Yasuda, Y. (1991) Hydraulic Jump in Sloping Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 117, n° 7, 905-921.
- Ohtsu, I.; Yasuda, Y. (1994). Characteristics of Supercritical Flow below Sluice Gate. *Journal Hydraulic Engineering*, vol.120, n. 3, p.332-346.
- Peterka, A J. (1974). *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25, Denver.
- Rajaratnam, N. (1967) Hydraulic Jumps. *Advances in Hydrosience*. 4:197-280. Ed. V. T. Chow, Academic Press: New York.
- Wiest, R. A. (2008). *Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico formado à Jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 141p.