

NOVA PROPOSTA DE ANÁLISE ADIMENSIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DA CALHA DE UM VERTEDEIRO EM DEGRAUS

Alba Valéria Brandão Canellas¹; Priscila dos Santos Priebe^{2}; Rute Ferla³; Carolina Kuhn Novakoski⁴; Augusto Ceron Reginatto⁵; Mauricio Dai Prá⁶; Daniela Guzzon Sanagiotto⁷; Luiz Augusto Magalhães Endres⁸ & Marcelo Giulian Marques⁹*

Resumo – Este artigo foi desenvolvido com o intuito de caracterizar os esforços extremos máximos atuantes em vertedouros em degraus com aeração natural. Analisou-se uma nova proposta adimensional da distribuição longitudinal das pressões na proximidade da quina dos degraus, baseada nas características geométricas e hidráulicas do escoamento sobre a calha do vertedouro. As análises foram realizadas em dois modelos físicos de um vertedouro com degraus de 0,06 m e 0,09 m de altura e declividade de 1V:0,75H. Analisando-se os resultados preliminares pode-se indicar que a nova proposta adimensional é adequada aos dados de pressões máximas extremas deste caso, no entanto devem ser verificados para outros dados de pressões.

Palavras-Chave – Pressões extremas, vertedouro em degraus.

NEW PROPOSAL FOR DIMENSIONLESS ANALYSIS OF PRESSURE DISTRIBUTION THROUGH THE STEPPED SPILLWAY CHUTE

Abstract – This article was developed with the purpose of characterizing the extreme maximum stresses exerted in naturally aerated stepped spillways. A new dimensionless proposal of the longitudinal distribution of the pressures in the vicinity of the corner of the steps was analyzed, based on the geometric and hydraulic characteristics of the flow through the stepped spillway chute. The analyzes were performed in two physical models of a stepped spillway with steps of 0.06 m and 0.09 m of height and slope of 1V:0.75H. By analyzing the preliminary results, it can be indicated that the new dimensionless proposal is adequate to the data of maximum extreme pressures of this case, nevertheless must be verified in case of other pressure datas.

Keywords – Extreme pressure, stepped spillway.

¹ Furnas Centrais Elétricas SA – alba.canellas@furnas.com.br

^{2*} Universidade Federal do Rio Grande do Sul – priscilaspriebe@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ruteferla@hotmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – carolkn04@gmail.com

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – augusto.creginatto@gmail.com

⁶ Universidade Federal de Pelotas – mdaipra@gmail.com

⁷ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – dsanagiotto@ufrgs.br

⁸ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – endres@ufrgs.br

⁹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – mgiulianm@gmail.com

* Autor Correspondente

INTRODUÇÃO

Vertedouros são responsáveis por descarregar o excesso de águas afluentes aos reservatórios durante as cheias, garantindo a segurança das barragens. Tais estruturas, quando construídas com calha constituída por degraus, dissipam grande parte da energia de montante durante a passagem do escoamento pela calha, sendo assim, as dimensões da estrutura de dissipação a jusante, seus custos de construção e os riscos de danos por erosão são reduzidos.

De acordo com Sanagiotto (2003), existem limitações na altura das barragens, nas vazões específicas e velocidade do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus devido à possibilidade de ocorrência de cavitação, principalmente na zona não aerada do escoamento. Segundo a autora, a cavitação está relacionada à ocorrência, nos degraus, de certos níveis de pressões negativas associados a determinadas frequências.

Visto que o conhecimento das pressões que ocorrem nos degraus é de grande importância para o dimensionamento estrutural do vertedouro, autores como Tozzi (1992), Juny *et al.* (2000), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Amador (2005), Gomes (2006), Conterato (2011), entre outros, analisaram a distribuição das pressões nos degraus de vertedouros com distintas características geométricas e hidráulicas. Osmar (2015) também caracterizou os esforços atuantes em vertedouro em degraus através da análise da variação das pressões atuantes ao longo da sua calha e, para possibilitar a comparação com resultados de outros autores, adimensionalizou as pressões através do coeficiente de pressão (C_p) (equação 1) e a posição das seções de medição ao longo do eixo da calha através da equação 2.

$$C_p = \frac{P/\gamma}{V_m^2/2 \cdot g} \quad (1)$$

Onde:

C_p = coeficiente de pressão (adimensional);

P/γ = carga de pressão que se deseja adimensionalizar (m.c.a.);

V_m = velocidade média do escoamento na seção (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

$$s' = \frac{(L - L_A)}{d_i} \quad (2)$$

Onde:

s' = posição longitudinal adimensional na calha;

L = posição ao longo da calha medida a partir da crista do vertedouro (m) e;

L_A = posição do início da aeração medida a partir da crista do vertedouro (m).

As figuras 1a e 1b apresentam os resultados para o coeficiente de pressão, obtidos por Osmar (2015) para as pressões extremas com probabilidades de não excedência de 0,1 e 99,9% para os espelhos e patamares dos degraus, respectivamente, comparados com os resultados de Amador (2005) e Gomes (2006).

Osmar (2015) verificou, através da comparação com estudos anteriores, que para os espelhos existe uma convergência com os resultados de Amador (2005) na maioria dos pontos, porém quando comparados com os estudos de Gomes (2006), os valores apresentaram convergência próximo ao ponto de início de aeração e, nos demais trechos, os valores do estudo de Osmar (2015) foram mais extremos. Já para os patamares dos degraus, os valores de C_p 99,9% são maiores que os informados

por Amador (2005). Osmar (2015) destaca que, em suas análises, os transdutores de pressão foram instalados em posições mais externas dos patamares que os ensaiados por Amador (2005), podendo ser este o motivo da divergência dos resultados.

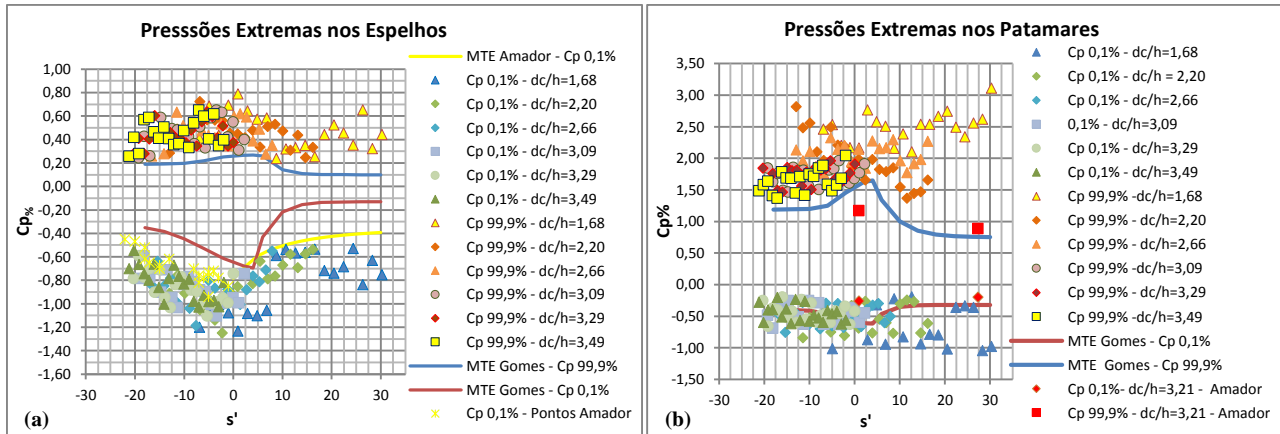


Figura 1 – Coeficiente de pressões extremas no (a) espelho e (b) patamar ($C_{p0,1\%}$ e $C_{p99,9\%}$) para diferentes vazões (onde dc é a profundidade crítica e h a altura do degrau). (Fonte: Osmar, 2015)

Entretanto, ao utilizar-se o coeficiente de pressão (C_p) obtido pela equação 1, introduzem-se os erros de cálculo da profundidade do escoamento em cada seção, podendo ocasionar divergências entre os resultados de pressões adimensionalizadas de diferentes autores. Desta forma, o objetivo deste trabalho é caracterizar os esforços extremos máximos atuantes em vertedouros em degraus com aeração natural, através de uma nova proposta de análise adimensional da distribuição longitudinal das pressões, na proximidade da quina dos degraus, baseada nas características geométricas e hidráulicas do escoamento sobre a calha do vertedouro.

METODOLOGIA

Os dados analisados foram obtidos em dois modelos físicos de vertedouro em degraus, apresentados nas figuras 2a e 2b, a seguir, por Sanagiotto (2003) e Conterato (2011). Os experimentos foram realizados no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Os modelos apresentam características semelhantes, as quais estão expostas na tabela 1, a seguir.



Figura 2 – Modelos físicos de vertedouro em degraus (a) Sanagiotto (2003) e (b) Conterato (2011).

Tabela 1 – Características básicas dos modelos físicos.

Características	Sanagiotto (2003)	Conterato (2011)
Declividade da calha	1V:0,75H	
Altura da calha do vertedouro	2,45 m	
Largura do canal	0,40 m	
Altura dos degraus	9 cm	6 cm

Experimento 1 - Sanagiotto (2003)

Conforme descrito por Sanagiotto (2003), os dados de pressão foram adquiridos em 5 degraus ao longo da calha do vertedouro em degraus, a 5 mm da quina no espelho e 3,75 mm da quina no patamar, no eixo da calha, através de transdutores da marca Hytronic, modelo TM25, com faixas de trabalho de 2,0 psi, distribuídos da seguinte forma: -1,0 a 1,0 psi; -0,5 a 1,5 psi e -1,5 a 0,5 psi, com erro de fundo de escala igual a +- 0,25% (+- 3,5 mm.c.a). Também foram utilizados transdutores da marca Sitron, modelo SP96, com faixa de trabalho de 5,0 psi, distribuídos de -2,5 a 2,5 psi e erro de fundo de escala de +- 0,5% (+- 17 mm.c.a).

Todos os transdutores de pressão foram submetidos a um processo de calibração estática, relacionando as medidas de tensão (Volts) a diversas colunas de água (P/γ). A aquisição dos dados foi realizada numa frequência de 50 Hz, em ensaios com duração de 180 segundos.

Experimento 2 – Conterato (2011)

De acordo com a descrição de Conterato (2011), os dados das pressões instantâneas ao longo da calha do vertedouro foram obtidos com 20 transdutores de pressão da marca Sitron modelo SP96. Dos transdutores utilizados, 10 possuem faixa de operação de +- 1,5 m.c.a e 10 de +- 2,5 m.c.a. Os dois modelos possuem erro esperado de +- 0,5% do fundo de escala. Os transdutores foram calibrados previamente utilizando o modelo para a curva de determinação de pressão por tensão para cada transdutor.

Os equipamentos foram instalados no patamar e no espelho dos 20 primeiros degraus, a 3 mm da quina, no eixo central da calha. Devido à dificuldade de instalação em todos os degraus simultaneamente, pela pequena distância entre eles, os ensaios foram divididos em duas etapas, medindo degraus pares e ímpares, em intervalos de 15 minutos, com frequência de aquisição de 128 Hz.

Metodologia de análise dos dados

As vazões específicas ensaiadas nos dois modelos e as características do escoamento estão apresentadas na tabela 2.

Para caracterizar as pressões nas estruturas, determinou-se a distribuição longitudinal das pressões extremas com aeração natural associada às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9%, que representam as pressões máximas. Apesar destas pressões ocorrerem durante pequena parcela de tempo, possibilitam a estimativa dos valores máximos que as pressões podem atingir.

Com as informações das pressões atuantes nas quinas dos degraus e a aplicação da técnica de análise dimensional, buscou-se definir os parâmetros adimensionais baseados nas características

geométricas e hidráulicas, de maneira a generalizar os resultados e caracterizar o comportamento da distribuição de pressões extremas máximas ao longo da calha de vertedouros em degraus.

Tabela 2 – Características do escoamento na calha do vertedouro em degraus para os estudos de Sanagiotto (2003) e Conterato (2011).

Sanagiotto (2003)			Conterato (2011)		
Vazão específica	Altura relativa	Número de Froude rugoso	Vazão específica	Altura relativa	Número de Froude rugoso
q (m ³ /s.m)	hc/hd	F*	q (m ³ /s.m)	hc/hd	F*
0,100	1,68	5,23	0,100	1,12	2,87
0,150	2,20	7,84	0,200	1,78	5,70
0,200	2,66	10,45	0,325	2,45	9,23
0,250	3,09	13,07	0,450	3,05	12,80
0,275	3,29	14,37	0,575	3,59	16,36
0,300	3,49	15,68	0,700	4,09	19,91

Onde hd é altura do degrau; $F^* = q / (g \cdot k^3 \cdot \text{sen} \alpha)$; α é a declividade da calha e $k = \text{hd} \cdot \text{cos} \alpha$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após análise dimensional dos dados, indica-se que os esforços extremos atuantes ao longo da calha do modelo físico do vertedouro em degraus são influenciados pelas características geométricas e hidráulicas do escoamento. Com isso, as pressões extremas máximas ($P_{x\%}/\gamma$) foram adimensionalizadas pela energia de montante em relação à quina de cada degrau em análise (z), conforme indicado na figura 3. A posição da seção ao longo da calha do vertedouro em degraus a partir do primeiro degrau (Li) foi adimensionalizada em relação à profundidade crítica do escoamento (hc), conforme apresentado na equação 3.

$$\frac{P_{x\%}/\gamma}{z} = f\left(\frac{Li}{hc}\right) \quad (3)$$

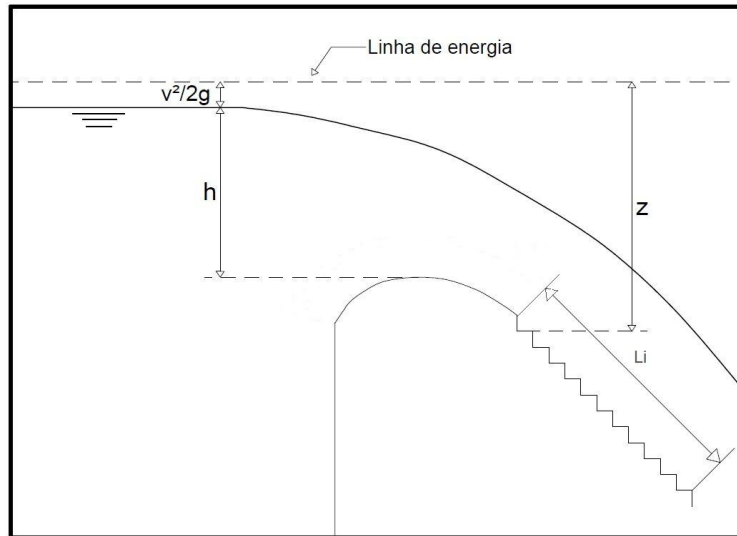


Figura 3 – Desenho esquemático indicando a variável z e Li .

As figuras 4 e 5 representam a relação entre os adimensionais de pressões extremas máximas associadas às probabilidade de não-excedência de 99,0% e 99,9%, respectivamente, em relação às posições de pressão ao longo da calha do vertedouro em degraus para o patamar e o espelho.

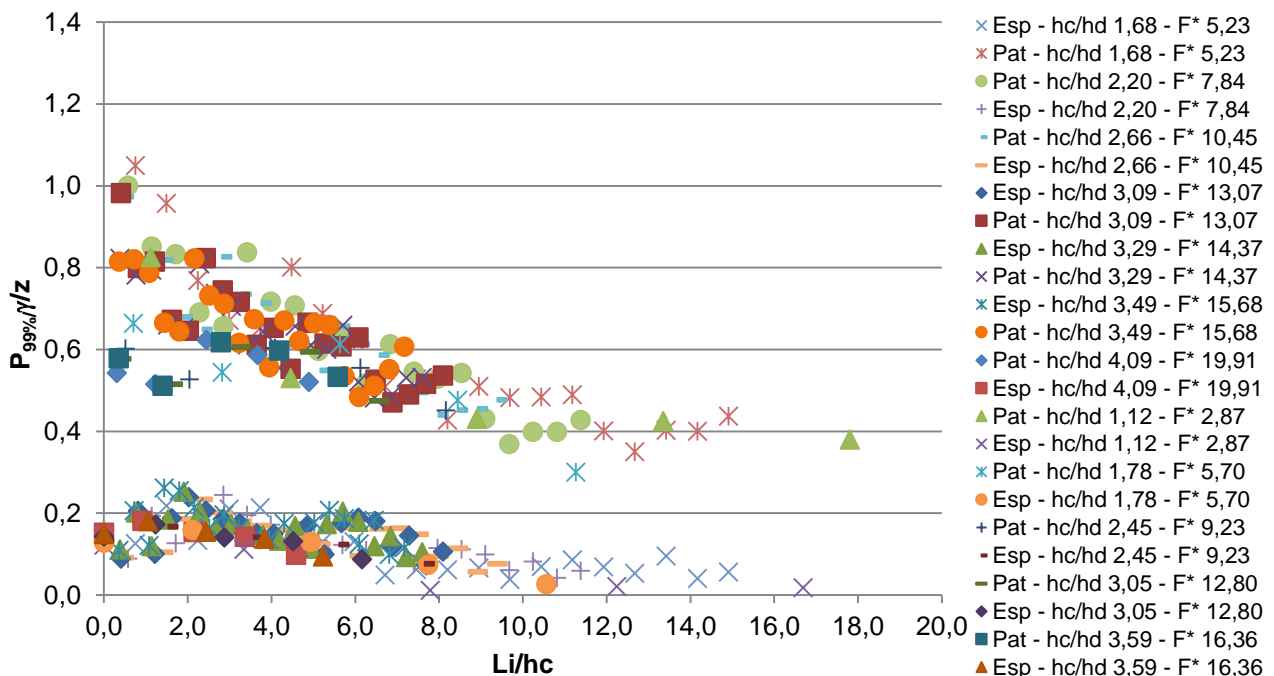


Figura 4 - Pressões extremas com 99,0% de probabilidade de não-excedência, adimensionalizadas no espelho (Esp) e patamar (Pat) do degrau, para diferentes vazões.

Analisando a Figura 4 percebe-se que, no caso do patamar, o adimensional de pressões extremas máximas com 99,0% de probabilidade de não-excedência varia em torno dos valores de pressão 0,4 a 1,0, sendo que possui uma maior dispersão até a posição adimensional em torno de 2,0. Com o aumento de valor da posição adimensional, as pressões tendem a diminuir até estabilizarem-se em

torno do valor de 0,4 a partir da posição adimensional 8,0. Isso ocorre devido ao valor de z aumentar e não, necessariamente, ao fato de as pressões estarem diminuindo para posições mais distantes da ogiva.

O adimensional de pressões extremas máximas no espelho do degrau possui menor dispersão, quando comparada ao patamar, contudo com valores inferiores variando em torno de 0,00 e 0,25. Após a posição adimensional 8,0 as pressões tendem a estabilizar-se próximas de 0,00, porém não significa que as pressões adimensionais estejam diminuindo, e sim, indica que as pressões médias em valor absoluto estão aumentando na mesma relação em que z está aumentando.

O comportamento das pressões extremas máximas com 99,9% de probabilidade de não-excedência adimensionalizadas pela energia de montante em relação à quina de cada degrau em análise, no patamar e no espelho (Figura 5), é muito semelhante ao comportamento das pressões máximas com 99,9% de probabilidade de não-excedência, porém com valores maiores.

No patamar, as pressões extremas máximas com 99,9% de probabilidade de não-excedência variaram em torno dos valores 0,6 a 1,0 e, no espelho, entre 0,00 e 0,35.

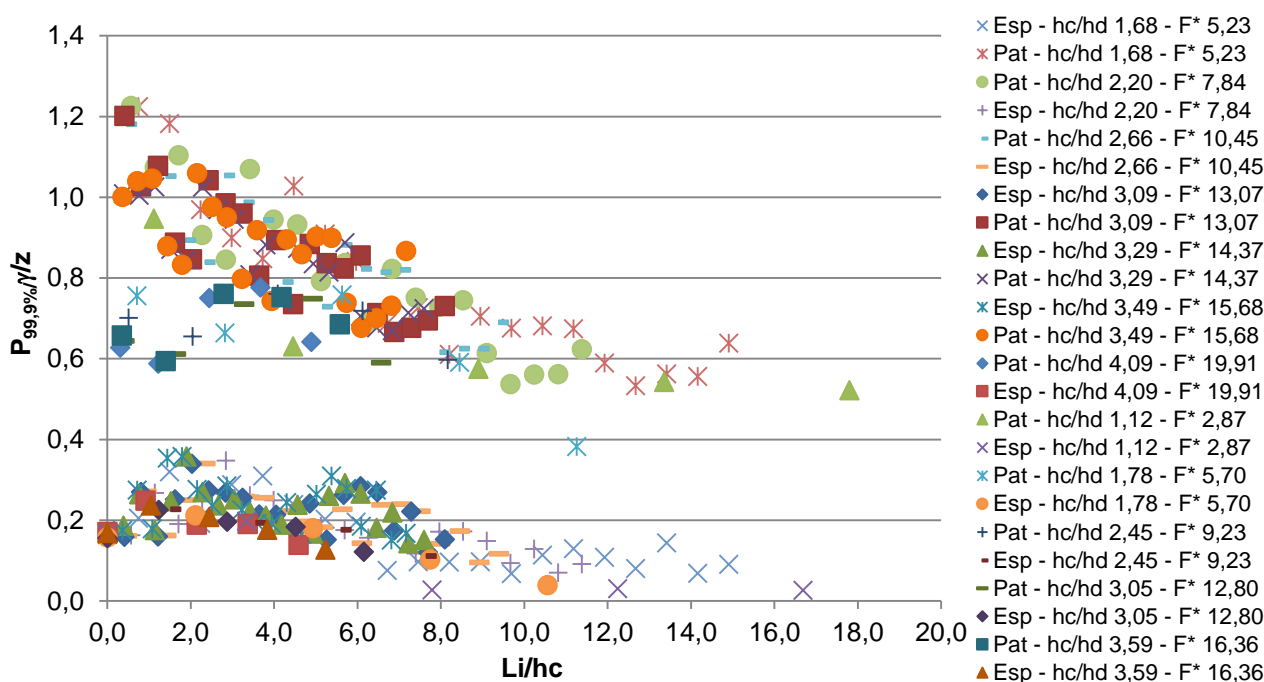


Figura 5 - Pressões extremas com 99,9% de probabilidade de não-excedência adimensionalizadas no espelho (Esp) e patamar (Pat) do degrau para diferentes vazões.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Até o presente momento, segundo análises preliminares, pode-se concluir que a nova proposta de adimensionalização de pressão e posição representa adequadamente os dados de pressões extremas máximas do patamar e do espelho do vertedouro em degraus com declividade 1,0H:0,75V e altura de degrau 6 e 9 cm, obtidos por Sanagiotto (2003) e Conterato (2011).

Para a continuação desta pesquisa será verificada a adequação dos adimensionais de pressão e posição para os dados de pressões médias e mínimas para o vertedouro com degrau de 3 cm de altura e, também, para o vertedouro com inclinação de 1,0H:1,0V.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições e empresas que contribuíram com apoio financeiro parcial para realização da pesquisa relacionada ao presente artigo, sendo eles a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS/Brasil), Furnas Centrais Elétricas S.A. e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS).

REFERÊNCIAS

- AMADOR, A. (2005). Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2005.
- CONTERATO, E. (2011). escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Declividade 1V:0,75H: Caracterização das Pressões e condições de aeração. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- DAI PRÁ, M. (2004). Uma Abordagem para Determinação das Pressões Junto ao Fundo de Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico. 2011. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2004.
- GOMES, J. F. (2006) Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. 2006. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2006.
- JUNY, M. S.; POMARES, J.; DOLZ, J. (2000). Pressure field in skimming flow over a stepped spillway. Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, ETII Zurich, Balkema, Rotterdam. pp. 137-145.
- OSMAR, F. M. (2015) Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2015.
- SANAGIOTTO, D. G. (2015). Características do escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de declividade 1V:0,75H. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2003.
- TOZZI, M. J. (1992) Caracterização/Comportamento de escoamento em Vertedouros com Paramento em Degraus. 1992. 302 f. Tese (Doutorado em Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.