

CAMPO DE PRESSÕES FLUTUANTES EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS SOBRE BARRAGENS DE CONCRETO

Jaime Federici Gomes¹; Marcelo Julian Marques² & Jorge Matos³

RESUMO --- No presente trabalho apresentam-se resultados do campo de pressões flutuantes no trecho não aerado e aerado em vertedouros em degraus com declives típicos do paramento de jusante de barragens de concreto (1V:0,75H). Para o efeito, desenvolveu-se investigação experimental numa instalação construída no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil. A instalação compreendeu um vertedouro com degraus de altura igual a 0,09 m. A máxima vazão específica foi de 0,7 m³/s, sendo o valor máximo da altura crítica adimensionalizada pela altura do degrau, d_c/h , igual a 4,09. A distribuição de pressões foi determinada para posições internas do degrau a distâncias do vértice correspondentes a 6% da dimensão do espelho e do patamar dos degraus. Na seção de afloramento da camada limite, verificou-se que os maiores coeficientes de pressão que poderão conduzir à ocorrência de cavitação.

ABSTRACT --- This paper presents the pressure fluctuations in both non-aerated and aerated flow regions over steeply sloping stepped spillways, typical on RCC dams (1V: 0.75H). An experimental study was conducted at the Hydraulic Research Institute (IPH) of the Federal University of Rio Grande do Sul State (UFRGS). A model chute including 0.09 m high steps was used. The maximum specific discharge tested in the model was 0.7 m³/s, being equivalent to a relative critical depth d_c/h equal to 4.09. The pressure distribution in the steps was determined for internal positions corresponding to distances to the step edge equal to 6% of the total length of the vertical and horizontal step faces. At the point of inception of air entrainment, the results showed that the largest pressure fluctuations coefficient that may lead to the tendency for cavitation inception.

Palavras-chave: vertedouros em degraus, medições de pressão, campo de pressões flutuantes

¹ Engenheiro Civil, Pós-Graduado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Consultor Autônomo. Contato: gomes.jaime@gmail.com.

² Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre. Contato: mmarques@iph.ufrgs.br.

³ Professor do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa. Contato: jm@civil.ist.utl.pt.

1 - INTRODUÇÃO

Desde a consolidação da tecnologia de concreto compactado com rolo (CCR), a partir da década de 70, o emprego de vertedouros em degraus como dissipadores de energia do escoamento tem sido bastante comum. Segundo Amador *et al.* (2004), os vertedouros em degraus foram utilizados em cerca de 30% das barragens construídas em CCR, no mundo, em 2003.

Essa tecnologia conseguiu agilizar as obras das barragens, dando flexibilidade e atingindo reduções de custos de cerca de 50% (Andriolo, 1998). Essa possibilidade de redução de custos aliada à dissipação de energia do escoamento ao longo da calha vem atendendo às atuais expectativas competitivas do mercado da construção civil de barragens.

Diversos estudos foram realizados com vista à melhoria do conhecimento do processo de aeração do escoamento – como Matos (1999) ou Boes e Hager (2003) - e de dissipação de energia ao longo da calha – como Tozzi (1992), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), ou Chanson *et al.* (2002), entre outros. Nestes trabalhos são propostas metodologias para o dimensionamento hidráulico de obras daquele tipo.

No que concerne à estimativa das condições conducentes à ocorrência de cavitação incipiente, ainda não se verifica um consenso na comunidade técnico-científica, o que se deve à inexistência de adequada modelação física desse fenômeno. Em Gomes (2006) é feita a avaliação preliminar de vazões específicas e velocidades médias críticas que conduzem à ocorrência de pressões extremas negativas da ordem da tensão de vapor da água, por meio do estudo experimental do campo de pressões em calha com ângulo (α) igual a 53,13º e altura de degrau (h) de 0,09 m.

No presente artigo apresentam-se alguns resultados ilustrativos do campo de pressões. A investigação experimental foi realizada nas instalações do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH / UFRGS) e são frutos do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento firmado entre IPH e Furnas Centrais Elétricas S.A., intitulado "Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus". Análises posteriores a esses trabalhos fizeram parte do convênio de intercâmbio técnico-científico realizado em 2005-2006 entre o Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa (IST/UTL), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC - Portugal) e o IPH/UFRGS.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em vertedouros escalonados, é relativamente reduzido o número de trabalhos que assentaram numa investigação detalhada da caracterização de pressões hidrodinâmicas, como Tozzi (1992), Olinger (2001), Sánchez-Juny (2001) e, mais recentemente, Amador (2005) e Sánchez-Juny e Dolz (2005). Aqueles autores procederam à avaliação do campo de pressões utilizando transdutores de pressão.

O campo de pressões reflete as características locais do escoamento, pelo que embora possa apresentar um padrão similar no interior das diversas cavidades ao longo do vertedouro, depende da velocidade e da quantidade de ar presente no escoamento.

Segundo Sánchez-Juny (2001) e Amador (2005), as pressões têm grande variabilidade a montante da seção de afloramento da camada limite (SACL), em comparação com as que ocorrem após a aeração do escoamento. Aqueles autores também identificaram que as pressões extremas máximas ocorreram próximas da posição média da SACL.

Analizando a distribuição das pressões médias nos degraus, Tozzi (1992), Olinger (2001) e demais autores observaram que elas são maiores nas extremidades externas nos paramentos horizontais (patamares) e menores, podendo ser negativas, nesse mesmo trecho nos paramentos verticais (espelhos). Quanto à flutuação das pressões, verificaram que os maiores valores também se encontram em idênticas regiões, perto do pseudofundo formado pelos cantos externos dos degraus.

Segundo Gomes (2006), os diagramas de pressões registrados nas soleiras dos degraus apresentam acentuada variabilidade espacial, tornando importante a adoção de critérios precisos para o dimensionamento hidráulico dessas estruturas.

3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O vertedouro em degraus estudado tem ângulo igual a 53,13°, largura de 0,40 m e altura de degraus de 0,09 m. A ogiva foi delineada segundo perfil Creager, sem degraus de transição (Figura 1a), para uma lâmina vertente de 0,40 m de carga. Foram ensaiadas vazões específicas variando entre 0,20 a 0,70 m³/s, representando a seguinte faixa da altura crítica adimensionalizada pela altura do degrau: $1,78 \leq d_c/h \leq 4,09$. Para esta faixa de vazão verificou-se a ocorrência do regime deslizante sobre turbilhões (“skimming flow”).

Os degraus instrumentados com tomadas de pressão podem ser observados na Figura 1b. Adotou-se uma localização equidistante entre si de maneira a permitir um estudo do campo de pressões em diferentes trechos e condições de escoamento sobre a calha. Além disso, essa configuração permitiu, dentro das características das instalações experimentais empregada, ter acesso para a montagem dos transdutores de pressão localizados em cada orifício de medida ilustrado na Figura 1b. Foram instrumentados cinco degraus e um total de 37 tomadas de pressão. A freqüência de aquisição e o tempo de registro das amostras de pressão foram iguais a 50 Hz e 3 minutos, respectivamente.

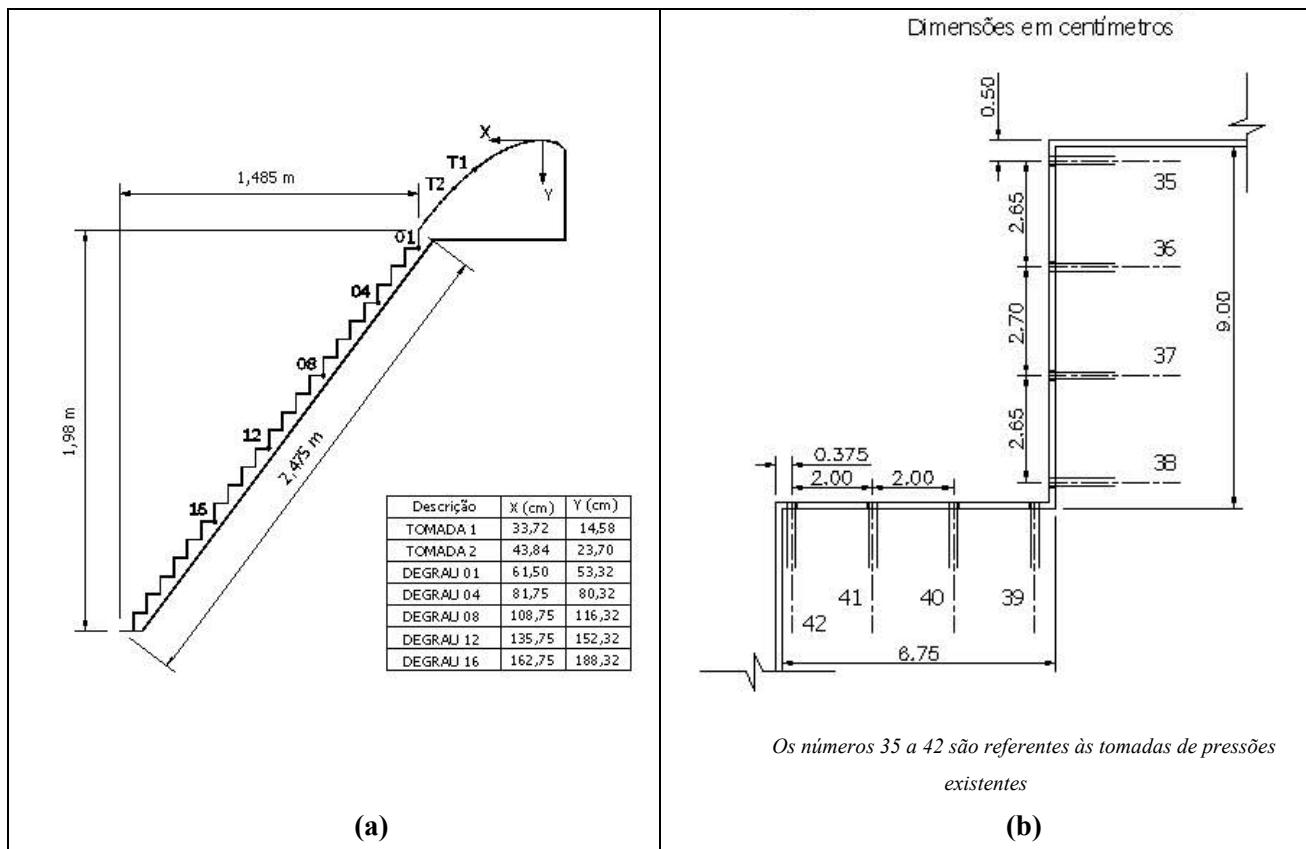


Figura 1 - Esquema da calha ensaiada e dos degraus instrumentados com as tomadas de pressão.

Para a localização longitudinal no vertedouro dos resultados aqui obtidos, utilizar-se-á a seguinte grandeza adimensional:

$$s' = \frac{(L - L_i)}{d_i} \quad (1)$$

sendo L a posição longitudinal ao longo do vertedouro em degraus (m), a partir da crista da ogiva do vertedouro; L_i a posição longitudinal média da SACL em (m), descrita pela formulação (2) e d_i a profundidade equivalente de água nessa última referida posição (m), formulação (3), ambas sugeridas por Matos (1999), a partir da soleira do vertedouro (Figura 2).

$$\frac{L_i}{k_s} = 6,289 \cdot Fr_*^{0,734} \quad (2)$$

$$\frac{d_i}{k_s} = 0,361 \cdot Fr_*^{0,606} \quad (3)$$

O número de Froude da rugosidade de forma é normalmente definido a partir das seguintes grandezas:

$$Fr_* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot k_s^3}} \quad (4)$$

$k_s = h \cos \alpha$ é a rugosidade de forma, de acordo com a Figura 3 (m);

q é a vazão específica (m^2/s);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

α é o ângulo da calha do vertedouro com a horizontal.

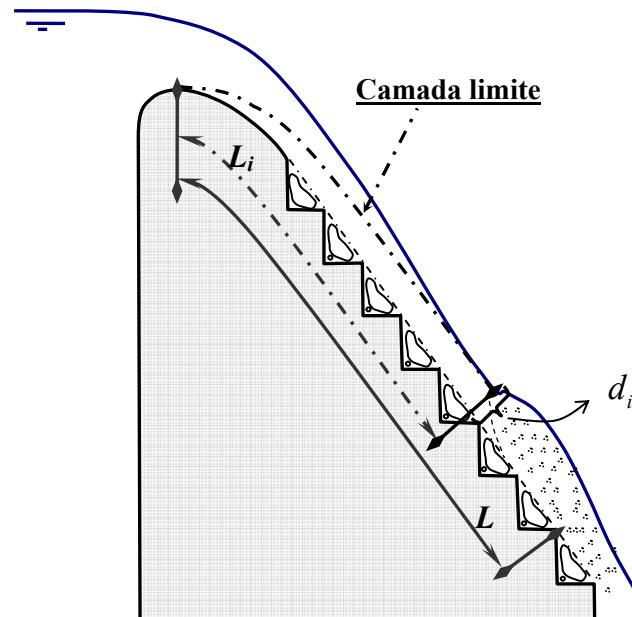


Figura 2 - Esquema ilustrativo da posição longitudinal de análise sobre o vertedouro em degraus.

Orifícios de medição

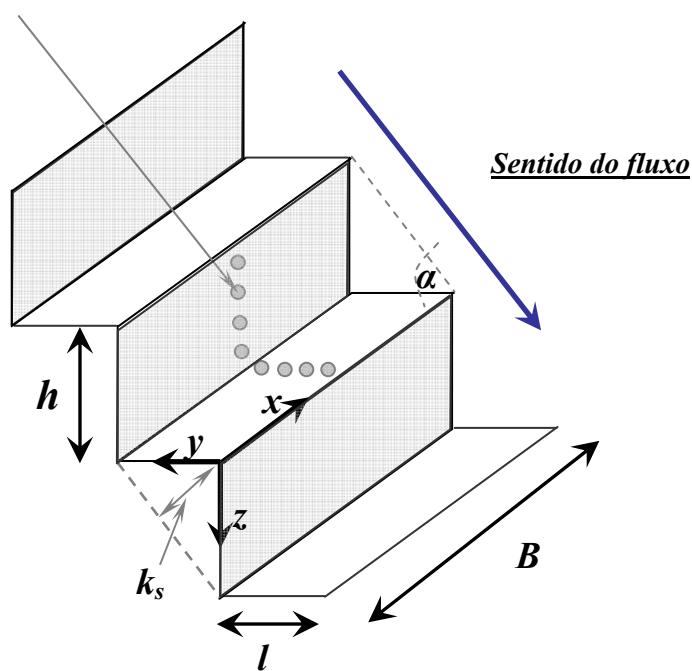


Figura 3 - Sistema de referência das tomadas de pressão localizadas no patamar e no espelho dos degraus.

Os resultados das análises de pressão serão apresentados em função do desvio padrão (σ_p/γ) das características estatísticas das amostras registradas e dos parâmetros adimensionais de posição previamente relacionados.

4 - RESULTADOS

A Figura 4 ilustra a distribuição de pressões flutuantes nos degraus, em que o desvio padrão se encontra adimensionalizado pelo produto do peso volúmico com a altura do degrau. Tanto para os espelhos quanto para os patamares, as maiores flutuações de pressões encontraram-se nas extremidades externas dos degraus, como observado em estudos anteriores sobre a mesma temática.

Nos espelhos dos degraus, para uma mesma vazão analisada, houve uma pequena variação dos desvios padrões para os trechos mais internos $z/h \approx 0,35$ e $z/h \approx 0,65$. Para $s' < 0$, a primeira posição indica flutuações maiores que a tomada de pressão localizada em $z/h \approx 0,65$, invertendo esse comportamento com a introdução de ar no escoamento, isto é, para $s' > 0$.

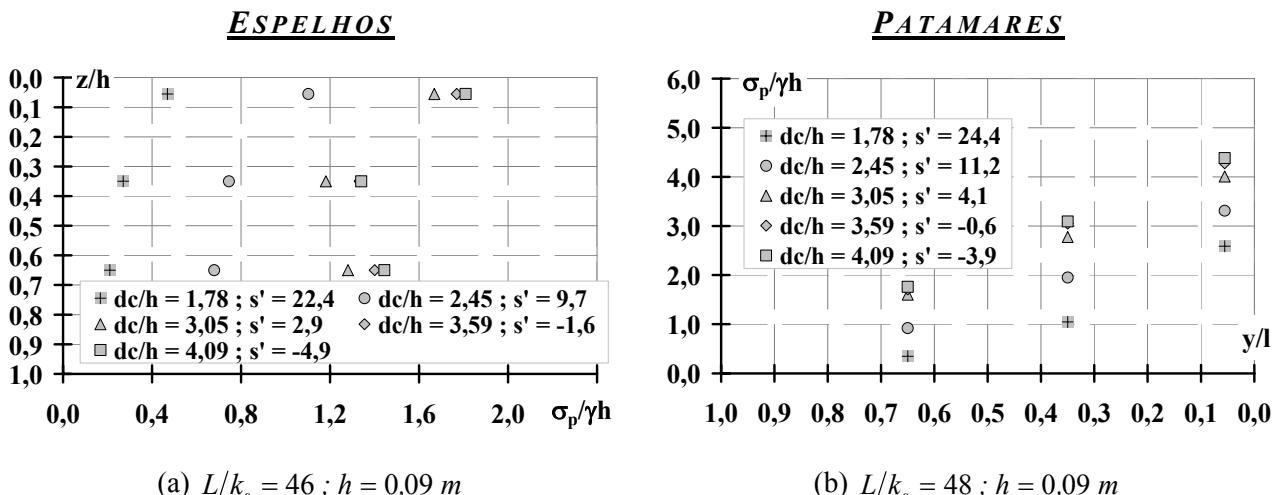


Figura 4 - Desvios padrões adimensionalizados pela altura do degrau ($\sigma_p/\gamma h$) para o espelho e patamar do degrau sob influência de diferentes condições de escoamento (s').

Ao longo do trecho analisado nos patamares, essas pressões apresentaram um andamento próximo do verificado para os valores médios apresentados por Gomes (2006), podendo atingir flutuações de até seis vezes a altura (h) dos degraus. Numa análise comparativa entre os desvios padrões e as pressões médias realizada por Gomes (2006), verificou-se que os valores dessas solicitações são da mesma ordem de grandeza. Nos patamares, para uma mesma vazão e posição ao longo da calha, são observados maiores flutuações de pressões do que os registrados nos espelhos dos degraus.

Para descrever a evolução longitudinal das pressões flutuantes ao longo do vertedouro, empregou-se a seguinte definição do coeficiente de pressão:

$$C_{\sigma_p} = \frac{\sigma_p}{\gamma \frac{U_m^2}{2g}} \quad (5)$$

As velocidades médias do escoamento foram obtidas pela metodologia desenvolvida por Matos (1999), que através de medições experimentais da velocidade do escoamento de emulsão e da concentração de ar, caracterizou o perfil da linha de água em vertedouros em degraus com declive igual ao do presente estudo.

Os resultados dos processamentos de dados podem ser vistos na Figura 5 e na Figura 6.

Como já mencionado por Matos et al. (1999), Amador (2005) e Gomes (2006), os maiores coeficientes de pressão flutuantes foram obtidos junto à posição de afloramento da camada limite (SACL), aqui delimitada por $-2,5 \leq s' \leq 4$. A variação longitudinal da SACL decorrente das oscilações simultâneas das principais macrocaracterísticas do escoamento, tais como: profundidades, superfície de água e entrada de ar, propiciam que nessa região se verifiquem maiores coeficientes e, por conseguinte, desvios das pressões hidrodinâmicas.

A jusante da SACL, o emulsionamento do escoamento reduz tais coeficientes, induzindo um efeito de amortecimento das pressões flutuantes. Segundo Matos (1999), para $s' > 4$, a concentração média de ar junto à pseudo-soleira pode atingir valores entre 5-8%. Essa concentração de ar coincidiu com o início do processo de atenuação dos coeficientes de pressão flutuantes verificados por Gomes (2006) e aqui ilustrados na Figura 5 e na Figura 6.

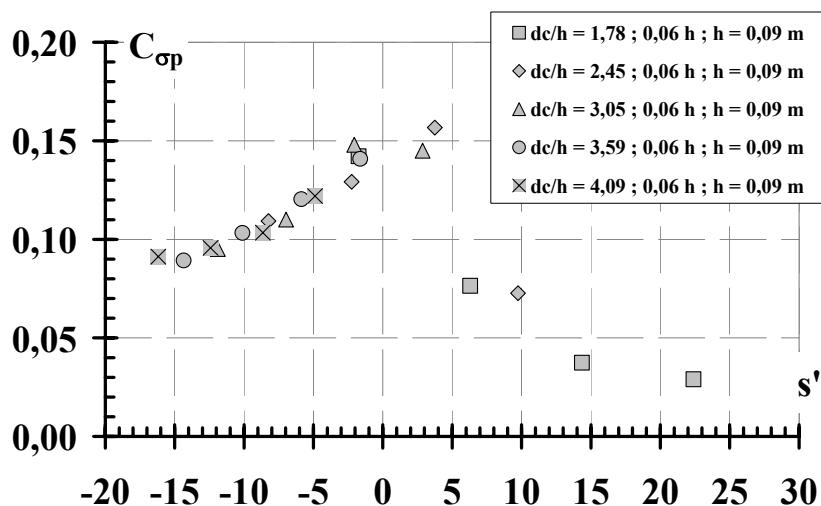


Figura 5 – Coeficientes de pressão flutuante (C_{σ_p}) obtidos na tomada de pressão localizada na posição interna $z/h = 0,06$ para várias condições de escoamento (s').

Esse fenômeno associa-se ao efeito observado em aeradores artificiais, onde a entrada de ar junto à soleira minimiza ou evita danos de cavitação em calhas com escoamento em altas velocidades. Peterka (1953) sugeriu que a presença de um teor volumétrico de ar na água de cerca de 8% seria suficiente para se evitar tais danos em superfícies de concreto. No caso de vertedouros em degraus, o processo de aeração ocorre naturalmente devido à sua elevada macrorugosidade, devendo as superfícies estar protegidas contra a erosão de cavitação no trecho da calha onde $s' \leq 4$ e a concentração de ar no escoamento é inferior ao referido limite de Peterka (1953). Gomes (2006) recomenda para essa última região que as velocidades devem ser inferiores a 17 m/s. Caso contrário, poderá haver lugar à ocorrência de cavitação, de acordo com a metodologia seguida.

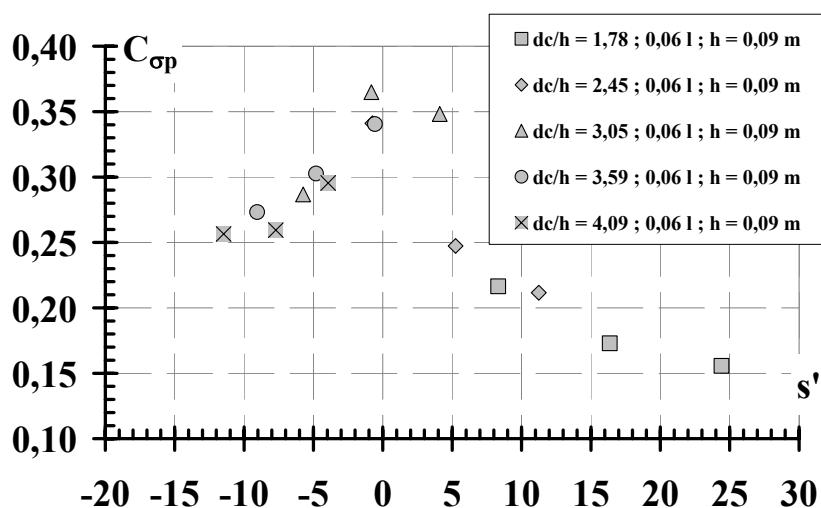


Figura 6 – Coeficientes de pressão flutuante (C_{σ_p}) obtidos na tomada de pressão localizada na posição interna $y/l = 0,06$ para várias condições de escoamento (s').

Devido a condicionantes de natureza experimental, foram realizadas medições de pressão em posições internas não inferiores a $z/h = 0,06$, o que não permite a extração de resultados para as regiões mais próximas da pseudo-soleira, uma lacuna que deverá ser preenchida para o adequado dimensionamento de vertedouros em degraus.

O aprofundamento desse estudo afigura-se necessário porque, por um lado, as flutuações de pressão aumentam à medida que se aproximam da pseudo-soleira, e, por outro, as pressões extremas tornam-se mais críticas, sendo as condições que determinam a ocorrência da cavitação incipiente mais conservativas. Em projetos para os quais as velocidades sejam próximas dos limites fornecidos por Gomes (2006), aconselha-se o estudo complementar do campo de pressões através de adequada modelagem física.

Outra questão importante a considerar no projeto de vertedouros em degraus diz respeito às dimensões dos degraus. O excessivo aumento da altura dos degraus não contribuirá para o

incremento da dissipação de energia (Tozzi, 1992), podendo traduzir-se no inconveniente acréscimo da extensão da soleira dos degraus sujeita a pressões negativas extremas, e, porventura, no risco de danos decorrentes de cavitação.

5 - CONCLUSÕES

No presente trabalho procedeu-se a uma sintética caracterização experimental do campo de pressões flutuantes nos degraus, com indicação dos esforços atuantes na cavidade interna para vertedouros com ângulo de 53,13° e na altura de degraus igual a 0,09 m.

Os maiores valores do coeficiente de pressão ocorrem junto da seção de afloramento da camada limite. Nessa região, em particular no interior da cavidade formada pelos degraus, verifica-se que os maiores valores têm lugar junto da pseudo-soleira.

Salientou-se, dentre das inúmeras demandas por estudos complementares ao entendimento do escoamento em vertedouros em degraus, uma lacuna na determinação da influência do aumento excessivo das dimensões dos degraus, que podem conduzir a maiores trechos dos degraus com pressões hidrodinâmicas eventualmente sujeitas ao risco de cavitação.

A título de ordem de grandeza, Gomes (2006) sugere que sejam respeitados limites máximos de velocidade de 17 m/s junto à SACL.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às instituições que prestaram apoio à realização desse trabalho:

- CNPq e CAPES;
- Furnas Centrais Elétricas S.A.;
- Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas;
- Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico;
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal).

BIBLIOGRAFIA

a) Livro

ANDRIOLI, F. R. (1998). "*The Use of Roller Compacted Concrete*", Oficina de Textos, São Paulo.

b) Artigo em revista

BOES, R. e HAGER, W. (2003). “*Two-phase flow characteristics of stepped spillways*”. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 129, nº 9, p. 661-670.

CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. (2002). “*Flow resistance in skimming flows in stepped spilways and its modelling*”. Can. Journal Civ. Eng., vol. 29, p. 809-819.

SÁNCHEZ-JUNY, M. e DOLZ, J. (2005). “*Experimental study of transition and skimming flows on stepped spillways in RCC dams: qualitative analysis and pressure measurements*”. Journal of Hydraulic Research, volume 43, n° 5.

c) Artigo em anais de congresso ou simpósio

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J.; SÁNCHEZ-TEMBLEQUE, F. e PUERTAS, J. (2004). “*Estudo experimental no campo de pressões e de velocidades num descarregador de cheias em degraus*”, 7º Congresso de Água de Portugal - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.

MATOS, J. S. G.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; QUINTELA, A.; DOLZ, J (1999). “*Characteristic Depth and Pressure Profiles in RDZ over Stepped Spillways*”. Proceedings XXVIII IAHR Congress, Graz, Austria.

PETERKA, A. J. (1953). “*The effect of entrained air on cavitation pitting*”. Minnesota International Hydraulics Convention - Proceedings Minneapolis: IAHR / ASCE, páginas 507-518, Minneapolis, Estados Unidos.

d) Tese e dissertações

AMADOR, A. (2005). “*Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos escalonados em presas de hormogón compactado*”. Tese de doutoramento. Universitat Politècnica de Cataluya (UPC) – Barcelona.

DAI PRÁ, M. (2004). “*Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade IV:1H*”, Dissertação de mestrado - IPH / Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOMES, F. J. (2006). “*Campo de Pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H*”. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MATOS, J. (1999). “*Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus*”. Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Portugal.

OLINGER, J. C. (2001). “*Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus*”. Tese de doutoramento - Universidade de São Paulo.

SANAGIOTTO, D. (2003). “*Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H*”, Dissertação de mestrado - IPH / Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SÁNCHEZ-JUNY, M. (2001). “*Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados em presas de hormigón compactado. Análisis del campo de presiones*”. Dissertação de doutoramento, Universidade Politécnica da Catalunha.

TOZZI, M. J. (1992). "Caracterização / comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus", Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.