

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

DISSIPACÃO DE ENERGIA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS: ANÁLISE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO

*Luísa Lüdtke Lauffer¹; Isadora M. Fraga²; Lucas C. da S. Tassinari³; Edgar F. Trierweiler Neto⁴
& Daniela G. Sanagiotto⁵*

RESUMO – As calhas em degraus têm sido utilizadas em vertedouros com o objetivo de reduzir os valores de energia residual no pé da estrutura, pois podem apresentar taxas de dissipação de energia do escoamento superiores a encontradas em estruturas lisas. Desta forma, as estruturas de dissipação de energia, como bacias de dissipação por ressalto hidráulico tornam-se mais econômicas do que as utilizadas em calhas convencionais. A eficiência na dissipação da energia do escoamento está associada às vazões específicas e à aeração ou não do fluxo ao longo da calha. Neste estudo, são apresentados resultados de dissipação de energia obtidos através da simulação numérica do escoamento, para um vertedouro em degraus com declividade de calha 1V: 0,75H e degraus com 6 cm de altura. As simulações foram realizadas em escala de modelo 1:10, visando comparar os resultados deste trabalho com resultados experimentais de estudos anteriores. Os resultados deste estudo indicaram uma mesma tendência no comportamento da dissipação de energia, porém os valores foram inferiores aos obtidos experimentalmente. O coeficiente de energia cinética ao longo da calha escalonada variou entre 1,01 e 1,17, sendo os maiores valores associados a região de escoamento aerado.

ABSTRACT– Stepped chutes have been used in spillways to reduce residual energy values at the toe of the structure, as they may present higher energy dissipation rates than those found in smooth spillways. So, energy dissipation structures become more economical than those used in conventional ones. The efficiency in the energy dissipation is associated with specific flow rates and aeration of the flow along the chute. In this study, results of energy dissipation obtained through numerical simulation are presented, for a stepped spillway with slope of 1V: 0,75H and steps with 6 cm of height. The simulations were performed in a 1:10 model scale, aiming to compare the results of this work with experimental results from previous studies. Results indicated the same trend in energy dissipation behavior, but the values were lower than those obtained experimentally. The kinetic energy coefficient along the channel varied between 1.01 and 1.17, with the highest values associated with the aerated flow region.

Palavras-Chave – escoamento aerado, calha escalonada, turbulência.

¹ Afiliação: IPH/UFRGS, (51) 3308-6114, luisalauffer@gmail.com

² Afiliação: IPH/UFRGS, (51) 3308-6114, isadora.m.fraga@gmail.com

³ Afiliação: IPH/UFRGS, (51) 3308-6114, lucascassinari@gmail.com

⁴ Afiliação: FURNAS, edtrier@furnas.com.br

⁵ Afiliação: IPH/UFRGS, (51) 3308-7930; dsanagiotto@ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

O escoamento sobre calhas escalonadas geralmente resulta em taxas de dissipação de energia superiores às observadas em estruturas com calhas lisas. A inserção de degraus ao longo da calha antecipa o afloramento da camada limite e, conseqüentemente, o início da aeração do escoamento. Estudos realizados anteriormente estão em concordância com o fato de que a ocorrência da aeração do escoamento em calhas escalonadas é benéfica no que diz respeito à dissipação de energia (e.g. Sanagiotto, 2003; Dai Prá, 2004). O início da aeração do escoamento depende de diversos fatores, entre eles, a declividade da calha, as dimensões dos degraus e as vazões. Para uma determinada geometria de calha em degraus, o aumento da vazão do escoamento conduz progressivamente o início da aeração para posições mais a jusante, sendo possível que o escoamento ocorra sem a aeração do fluxo. Nestas condições, a eficiência na dissipação de energia na calha é menor e, as estruturas de jusante devem estar dimensionadas para dissipar a energia residual de forma segura.

Quando se trata do escoamento sobre calhas escalonadas, como a de vertedouros em degraus, o aspecto mais estudado é o fenômeno de dissipação de energia ao longo dos seus degraus. Pode-se avaliar a dissipação de energia na calha do vertedouro em degraus (ou a energia residual) em relação à energia total a montante. Para isso, é necessário o conhecimento das profundidades do escoamento ao longo da calha e dos perfis de velocidade, como tem sido avaliado experimentalmente (e.g. Sanagiotto e Marques, 2008; Amador *et al*, 2006) e através de simulação numérica do escoamento (e.g. Arantes, 2007; Simões, 2012). Ainda há uma forma indireta de avaliar a energia residual no pé do vertedouro: através da medição da altura conjugada lenta do ressalto hidráulico formado no pé da estrutura, e, por conseguinte, na determinação da altura rápida e energia residual nessa posição (e.g. Tozzi, 1992; Pegram *et al*, 1999; Aal, 2018). Geralmente essa segunda metodologia é utilizada em estudos experimentais, em que pode ser mais simples a quantificação da altura conjugada lenta do ressalto hidráulico, do que a análise do comportamento das profundidades e velocidades do escoamento ao longo da calha.

Neste trabalho, são realizadas avaliações da dissipação de energia do escoamento em relação à energia total de montante, através de simulação numérica do escoamento, onde o comportamento das profundidades do escoamento e dos perfis de velocidade podem ser definidos. Os resultados obtidos neste estudo são comparados com resultados provenientes de estudo experimental (Sanagiotto, 2003; Sanagiotto e Marques, 2008).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição da estrutura

A estrutura considerada neste trabalho foi um vertedouro em degraus em escala 1:10, com declividade da calha de 1V:0,75H e degraus com altura igual a 0,06 m e patamar igual 0,045 m em escala de modelo. O perfil da crista do vertedouro é do tipo Creager, com carga de projeto (H_d) igual a 0,4 m, de equação $Y=1,08945 X^{1,85}$.

Mais informações sobre a geometria analisada podem ser consultadas em Sanagiotto (2003), que apresentou resultados experimentais referentes ao modelo físico desta estrutura.

2.2. Simulação numérica do escoamento

Foram realizadas simulações tridimensionais do escoamento utilizando o *software* Ansys CFX, que utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações da continuidade e momentum (Ansys, 2013). A turbulência foi modelada utilizando a decomposição de Reynolds, RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) em três dimensões. O modelo de turbulência utilizado foi o k-ε. Este modelo de turbulência já foi estudado por outros autores em simulações numéricas do escoamento em vertedouros em degraus apresentando resultados satisfatórios, como Chen *et al* (2002) e Toro *et al* (2016), por exemplo. As equações da continuidade e de momentum resolvidas pelo programa são, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2)$$

onde: ρ é a massa específica; U representa a série temporal de velocidade, que pode ser decomposta em uma parcela média e uma parcela de flutuação, que é variável no tempo t ; μ é a viscosidade dinâmica; μ_t é a viscosidade turbulenta; p' é a pressão modificada ($p'=p + 2/3 \cdot \rho \cdot k$, com k igual a energia cinética da turbulência) e S_M é o somatório das forças gravitacionais (Ansys, 2013).

O modelo multifásico adotado foi o homogêneo, com modelo de superfície livre na interface. O modelo homogêneo corresponde ao método VOF (*Volume of Fluid*), proposto por Hirt e Nichols (1981). Neste método, as equações do escoamento são resolvidas, armazenando o volume das duas fases fluidas em cada célula computacional. Nas células, a soma das frações de volume de ar e água é igual a unidade.

Para a discretização do domínio geométrico, foi definida uma malha não estruturada, tetraédrica, com aproximadamente $1,2 \times 10^6$ nós e $1,1 \times 10^6$ elementos. Foi utilizada a adaptação de malha na interface ar-água para melhorar a definição da superfície livre. A malha possui maior detalhamento na região dos degraus. A escolha da malha se deu após testes de convergência de malha, com base no Índice de Convergência de Malha, GCI (*Grid Convergence Index*), apresentado por Celik *et al* (2008). O domínio das simulações está representado na Figura 1, assim como a malha utilizada com detalhamento na região dos degraus.

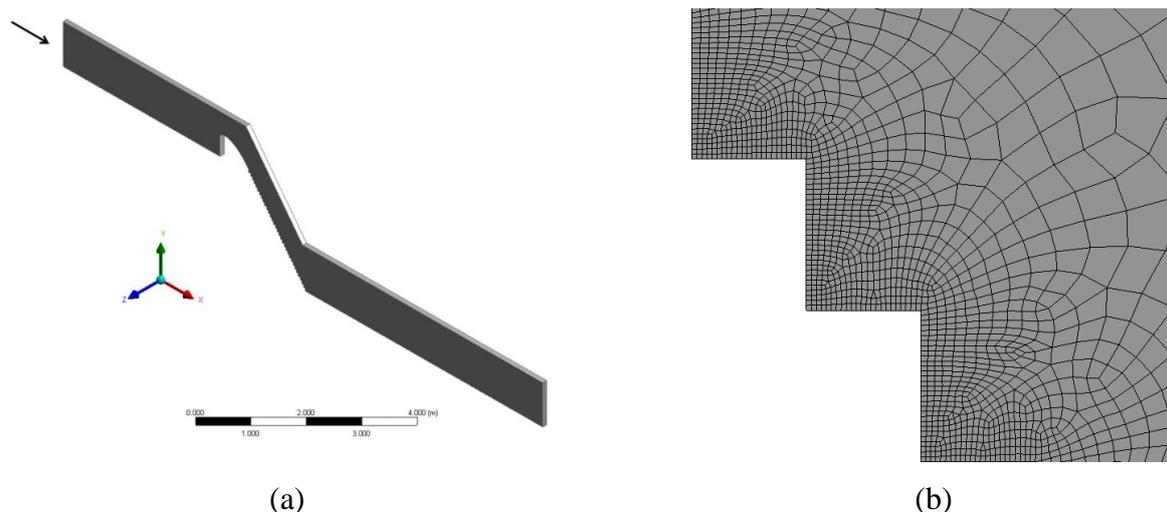


Figura 1 - (a) Domínio geométrico utilizado nas simulações e (b) detalhe da malha na região dos degraus.

2.3. Condições simuladas

Foram realizadas simulações numéricas do escoamento para vazões específicas iguais a $0,20 \text{ m}^3/(\text{s.m})$, $0,30 \text{ m}^3/(\text{s.m})$ e $0,33 \text{ m}^3/(\text{s.m})$. A condição de contorno de não deslizamento foi aplicada em todas as paredes da estrutura. Na entrada foi definida uma vazão mássica referente às vazões específicas já mencionadas e com intensidade turbulenta de 10%. Na saída foi definido que o fluido escoar somente para fora do domínio. O topo da estrutura foi considerado aberto, submetido a pressão atmosférica. Foi definido um plano de simetria, que considera o escoamento simétrico, para utilizar um domínio de menor largura de vertedouro (0,10 m), reduzindo a malha e o esforço computacional.

2.4. Análise dos dados

Os resultados de velocidade do escoamento foram analisados em perfis perpendiculares ao pseudofundo do vertedouro, na metade da largura da calha e alinhados a quina superior dos degraus, conforme as medições experimentais feitas por Sanagiotto (2003). As profundidades do escoamento foram obtidas considerando-se a posição em que os volumes de cálculo apresentavam fração de água

igual a 0,5. Geralmente a superfície livre de escoamentos obtidos a partir de simulação numérica, utilizando o método VOF, é definida pela posição correspondente a fração de água igual a 0,5 (e.g. Bombardelli *et al*, 2011; Toro *et al*, 2016).

O cálculo da energia em qualquer ponto ao longo da calha (E_p), foi realizado a partir da equação (3), de acordo com Chow (1959) para canais de grande declividade.

$$E_p = z_p + h \cdot \cos\theta + \alpha \cdot \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (3)$$

onde: z_p é a cota do piso do degrau na seção considerada em relação ao plano de referência, h é a profundidade do escoamento medida perpendicularmente na quina superior do degrau considerado, θ é o ângulo de inclinação da calha, \bar{V} é a velocidade média correspondente e α é o coeficiente de Coriolis ou coeficiente de energia cinética, que pode ser calculado a partir do conhecimento do perfil de velocidades do escoamento, através da equação:

$$\alpha = \frac{1}{A} \int \left(\frac{u}{\bar{V}}\right)^3 dA \quad (4)$$

onde: A é a seção transversal do escoamento, u é o perfil de velocidades, \bar{V} é a velocidade média do escoamento.

A energia a montante (E_m) foi calculada a partir da equação (5).

$$E_m = Y + 1,5h_c \quad (5)$$

onde: Y é a diferença entre a cota da crista do vertedouro e a cota da posição em que está sendo avaliada a dissipação de energia e h_c é a altura crítica do escoamento.

O cálculo foi realizado considerando-se um plano de referência distinto para cada degrau. Desta forma, na equação (3) tem-se $z_p = 0$ e na equação (5), Y expressa a altura do vertedouro relativa.

A energia dissipada em relação a energia de montante ($\Delta E/E_m$) foi calculada em todos os degraus da calha do vertedouro e é dada pela equação (6):

$$\frac{\Delta E}{E_m} = \frac{E_m - E_p}{E_m} \quad (6)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência são apresentados os perfis de velocidade, os valores calculados de coeficientes de energia cinética e resultados de dissipação de energia. A validação do processo de simulação não será apresentada neste documento, sendo que foi detalhado em um outro artigo, que se encontra em fase de revisão.

3.1. Perfis de velocidade

A partir dos dados adquiridos numericamente do perfil perpendicular ao pseudofundo foram obtidos os perfis de velocidade de cada degrau. A Figura 2 apresenta os perfis de velocidade de dois degraus para as três diferentes vazões, relacionando a posição do escoamento em cada ponto (y) com a profundidade da superfície livre do degrau considerado (h). Nesta figura as velocidades estão adimensionalizadas pela velocidade máxima observada em cada perfil de velocidades.

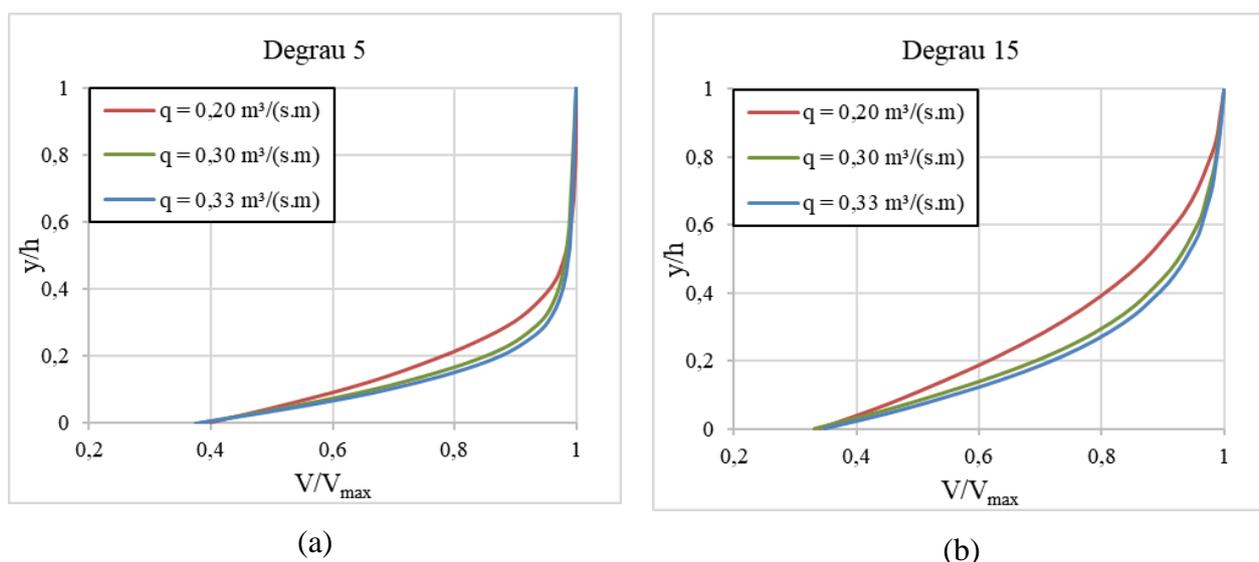


Figura 2 – Perfis de velocidade do escoamento nos degraus (a) 5 e (b) 15 para os diferentes valores de vazões específicas.

Observa-se que para um mesmo degrau, os perfis adimensionalizados indicam que o aumento da vazão resulta em maiores gradientes de velocidades, consequência da redução da espessura da camada limite com o aumento de vazão.

A velocidade média do escoamento foi calculada a partir da equação (7) e seus valores estão apresentados no gráfico da Figura 3.

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int u \, dA \quad (7)$$

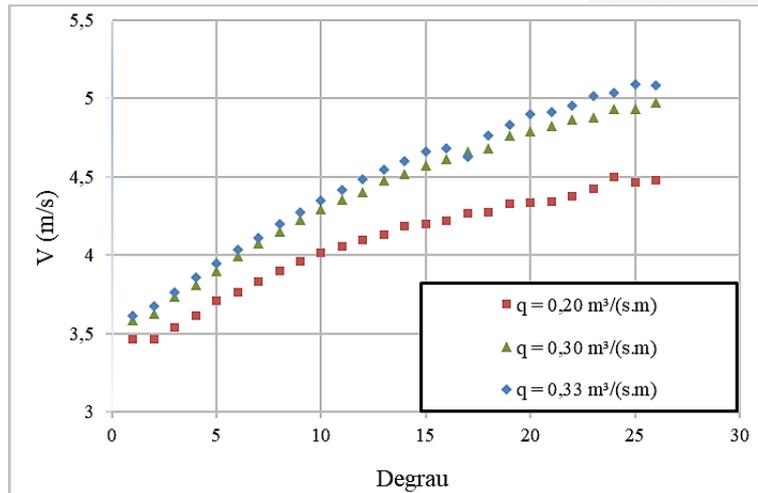


Figura 3 – Velocidades médias do escoamento para os diferentes valores de vazões específicas.

Notou-se que em um mesmo degrau, a velocidade média do escoamento é maior para maiores vazões e aumenta conforme o escoamento se desenvolve, esses valores são parâmetros importantes para o cálculo do coeficiente de energia cinética e da energia ao longo da calha.

3.2. Coeficiente de energia cinética

A partir do perfil de velocidades, o coeficiente de energia cinética foi calculado para cada degrau conforme a equação (4). Os valores calculados de α variam entre 1,01 e 1,17, sendo o valor médio igual a 1,12. Estes valores estão próximos aos encontrados por Arantes (2007), que obteve valores de α entre 1,085 e 1,149, sendo o valor médio igual a 1,10.

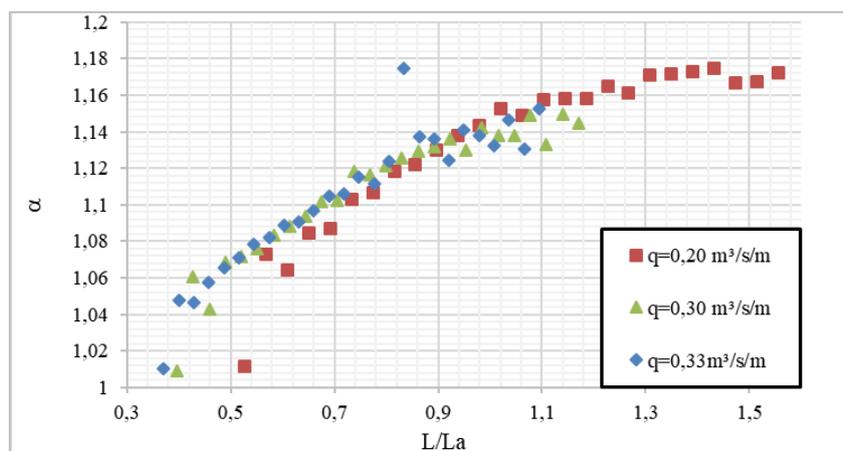


Figura 4 – Coeficientes de energia cinética calculados neste trabalho em relação à adimensionalização L/L_a , em que L é a distância medida a partir do desenvolvimento do perfil Creager, alinhada a este e ao pseudofundo do canal até o degrau de análise e L_a é a distância até no mesmo alinhamento até o degrau de início de aeração.

No gráfico da Figura 4, o coeficiente de energia cinética é apresentado em função da relação adimensional L/L_a . Percebe-se um aumento dos valores de α no sentido do escoamento, na região não aerada do escoamento. Para a região aerada do escoamento ($L/L_a > 1,0$) há indícios de que os valores de α tendem a um valor constante, neste estudo entre 1,15 e 1,17.

3.3. Dissipação de energia

No cálculo da energia em qualquer ponto da calha, feito através da equação (3), o coeficiente de energia cinética foi avaliado de duas maneiras: calculado para cada degrau e considerado igual a 1,0. Ao se comparar os resultados de $\Delta E/E_m$ calculados com $\alpha=1,0$ e com os diferentes α calculados, obtém-se diferenças que variam de 1% a 12%. Considerando que em Sanagiotto (2003), o coeficiente de energia cinética foi considerado igual a 1,0 e para permitir a comparação com os dados experimentais, os resultados de $\Delta E/E_m$ são apresentados também fazendo esta consideração.

Os resultados de dissipação de energia em relação a energia de montante podem ser visualizados no gráfico da Figura 5 e são apresentados em função da relação adimensional de Y/h_c , onde Y é a diferença entre a cota da crista do vertedouro e a cota da posição em que está sendo avaliada a dissipação de energia. Este gráfico mostra que os valores encontrados neste trabalho estão abaixo dos resultados obtidos experimentalmente por Sanagiotto (2003). Assim como observado por Sanagiotto (2003), neste estudo percebe-se que os valores de dissipação de energia em relação a montante aumentam no sentido do escoamento (maiores valores de Y) e diminuem com o aumento da vazão (maiores h_c).

Considerando os vários equacionamentos disponíveis na literatura, os resultados obtidos neste estudo estão em maior concordância com as equações propostas por Stephenson (1991) e Pegram *et al* (1999). A equação (9) proposta por Stephenson (1991), é uma equação teórica e a equação (10) de Pegram *et al.* (1999) é uma equação empírica.

$$\frac{\Delta E}{E_m} = 1 - \left[\left[\frac{f}{8 \sin \alpha} \right]^{\frac{1}{3}} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left[\frac{f}{8 \sin \alpha} \right]^{\frac{-2}{3}} \right] \frac{h_c}{H_v} \quad (9)$$

$$E_R = 4,42 h_2^{0,685} \quad (10)$$

onde: $\Delta E/E_m$ é a dissipação de energia em relação a energia total a montante, E_m é a energia total a montante, f é o fator de resistência, α é a declividade da calha do vertedouro, h_c é a profundidade crítica do escoamento, H_v é a altura total do vertedouro, E_r é a energia residual no pé do vertedouro e h_2 é a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico formado no pé do vertedouro.

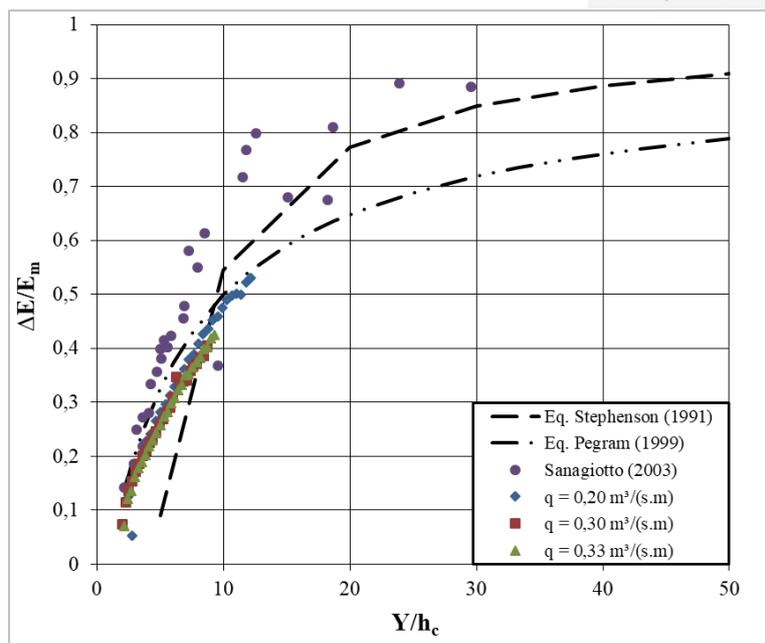


Figura 5 – Resultados de dissipação de energia em relação a montante obtidos neste estudo comparados com resultados experimentais de outros autores. Resultados de Sanagiotto et al. (2003) para vazões entre 0,03 e 0,70 m³/(s.m).

4. CONCLUSÕES

As análises apresentadas neste trabalho indicaram que as simulações numéricas do escoamento são adequadas para avaliar a dissipação da energia ao longo de uma calha em degraus. Observou-se que os resultados deste trabalho foram mais conservadores, com menores taxas de dissipação de energia em relação às avaliações experimentais. Os valores do coeficiente de energia cinética variaram entre 1,01 e 1,17, com a tendência de se tornarem constantes para a região aerada do escoamento. Estudos adicionais devem ser conduzidos para verificar, por exemplo, se a consideração da profundidade do escoamento para a fração de água de 50% é a mais adequada. Também pretende-se analisar outras descargas e outras geometrias de calhas escalonadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do Projeto de P&D intitulado “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Forçada (Pré-Aeração)” firmado entre DTEH.E/GST.E/FURNAS e FAURGS/IPH/UFRGS. Este trabalho também recebeu apoio da CAPES-Brasil, do CNPq e da Propesq/UFRGS, pelo qual os autores agradecem.

REFERÊNCIAS

1. AAL, G.M.A. et al. (2018). “Improving energy dissipation on stepped spillways using breakers” *Ain Shams Engineering Journal*, 9, pp. 1887–1896.
2. AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. (2006). “Characterization of the Nonaerated Flow Region in a Stepped Spillway by PIV. *Journal of Fluids Engineering*, 128(14), pp. 1266-1273.
3. ANSYS (2013). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 15.0*. Ansys, Inc., Canonsburg, PA.
4. ARANTES, E. J. (2007). *Caracterização do escoamento sobre Vertedouros em Degraus via CFD*. Universidade de São Paulo.
5. BOMBARDELLI, F. A.; MEIRELES, I.; MATOS, J. (2011). “Simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways”. *Environmental Fluid Mechanics*, 263–288.
6. CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J. (2008). “Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications”. *Journal of Fluids Engineering* 130(7).
7. CHEN, Q.; DAI, G.; LIU, H. (2002). “Volume of Fluid for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow”. *Journal of Hydraulic Engineering* 128 (7), pp. 683-688.
8. CHOW, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, 680p.
9. DAI PRÁ, M. (2004). *Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:1H*. Dissertação. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
10. HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. (1981). “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”. *Journal of Computational Physics* 39, pp. 201-225.
11. PEGRAM, G. G. S., OFFICER, A. K. MOTTRAM, S. R. (1999). “Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways”. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(5), pp. 500-510.
12. SANAGIOTTO, D. G. (2003). *Características do escoamento sobre vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H*, Dissertação. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
13. SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. (2008). “Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H”, 13, 17–31.
14. SIMÕES, A. (2012). *Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas*. Tese. Universidade de São Paulo.
15. STEPHENSON, D. (1991). “Energy dissipation down stepped spillways”. *Water Power & Dam Construction*, Sutton 43(9), pp. 27-30.
16. TORO, J. P.; BOMBARDELLI, F. A.; PAIK, J.; MEIRELES, I.; AMADOR, A. (2016). “Characterization of turbulence statistics on the non-aerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study”, *Environmental Fluid Mechanics*, 16 (6), 1195–1221.
17. TOZZI, M. J. (1992). *Caracterização/comportamento de escoamento em vertedouros com paramento em degraus*. Tese. Universidade de São Paulo, USP, São Paulo.