



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

CAPACIDADE DE VAZÃO E DISSIPACÃO DE ENERGIA DO ESCOAMENTO EM DESCARREGADORES DE CHEIAS EM DEGRAUS COM SOLEIRA EM TECLADO DE PIANO

Rogério GOMES¹; Jorge MATOS²; Teresa VISEU³

¹ Estudante, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, rcastilhogomes@gmail.com

² CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, jorge.matos@tecnico.ulisboa.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, tviseu@lnec.pt

Resumo

A recente evolução do conhecimento hidrológico, nomeadamente no que concerne aos fenómenos meteorológicos extremos, tem vindo a determinar a revisão dos caudais de dimensionamento de várias barragens. Neste contexto, a solução a adotar para assegurar a segurança da barragem poderá envolver o aumento da capacidade de vazão dos descarregadores de cheias, nomeadamente através da reabilitação das respetivas soleiras descarregadoras, conduzindo a soluções hidráulicas mais eficazes. Nestes casos, constitui uma solução corrente a utilização de soleiras em labirinto, ou, mais recentemente, de soleiras em teclado de piano.

A presente comunicação inclui um estudo da capacidade de vazão e da dissipação de energia num descarregador de cheias em degraus com soleira descarregadora em teclado de piano (PKW), assim como uma análise comparativa com os resultados anteriormente obtidos com uma soleira do tipo WES.

Os resultados evidenciam que a curva de vazão obtida neste estudo é próxima da obtida em estudos anteriores, na mesma instalação experimental. Verifica-se que o caudal escoado sobre a soleira descarregadora do tipo PKW é consideravelmente superior ao escoado sobre uma soleira do tipo WES, para idêntica largura do descarregador e carga sobre a crista.

A partir das alturas piezométricas, obtidas a jusante do ressalto hidráulico, estimou-se a altura equivalente de água e a energia específica residual imediatamente a montante do ressalto hidráulico, assim como a perda de carga total no descarregador, para soleiras descarregadoras do tipo WES e PKW, com alturas dos degraus do descarregador de 4 e 8 cm. Os resultados obtidos são bastante próximos, afigurando-se adequada a utilização de uma única expressão adimensional para estimar a perda de carga total no descarregador, independentemente do tipo de soleira e da altura dos degraus.

Palavras-chave: descarregador de cheias em degraus, soleira descarregadora em teclado de piano (PKW), escoamento deslizante sobre turbilhões, bacia de dissipação de energia, perda de carga.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

No dimensionamento de uma barragem é fundamental garantir a segurança hidráulico-operacional ao longo da sua vida útil. Com o aumento do conhecimento hidrológico, decorrente de séries de dados mais extensas, e das alterações que se fazem notar ao nível climático, nomeadamente no que concerne aos fenómenos meteorológicos extremos, tem-se vindo a efetuar a revisão dos caudais de dimensionamento de várias barragens existentes.

Por forma a garantir o correto funcionamento dos respetivos descarregadores de cheias, a solução a adotar poderá envolver o aumento da capacidade de vazão dos descarregadores de cheias já existentes, nomeadamente através da reabilitação das correspondentes soleiras descarregadoras, conduzindo a soluções hidráulicamente mais eficazes. Nestes casos, constitui uma solução corrente a utilização de soleiras em labirinto, ou, mais recentemente, de soleiras em teclado de piano.

A soleira descarregadora em teclado de piano, pioneiramente desenvolvida pela empresa Hydrocoop, em França, tem sido apresentada como sendo hidráulicamente mais eficaz do que a soleira em labirinto e com vantagem em relação a esta última pela facilidade de instalação no topo de uma barragem de gravidade.

O presente estudo vem no seguimento de outros, realizados num descarregador em degraus existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), nomeadamente por Matos (1999), Meireles (2004, 2011), Renna (2004) e Cardoso (2007), com soleira descarregadora do tipo WES. Foram posteriormente realizados outros estudos na mesma instalação experimental, com relevância para a presente investigação (Reis, 2015 e Pinto, 2017), em que a soleira descarregadora do tipo WES foi substituída por uma soleira em teclado de piano.

Esta comunicação incide no estudo da capacidade de vazão e da dissipação de energia num descarregador de cheias em degraus com soleira descarregadora em teclado de piano (PKW), sendo feita uma análise comparativa com os resultados anteriormente obtidos com uma soleira do tipo WES.

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

2.1. Caracterização geral

A instalação experimental é, no essencial, constituída pelo reservatório de entrada, soleira descarregadora em teclado de piano, descarregador em degraus, bacia de dissipação e canal de regularização.

A altura do descarregador em degraus com soleira descarregadora em teclado de piano é igual a 2,96 m (desde o pé do descarregador até à crista da soleira descarregadora), a largura do descarregador é de 1,0 m e o canal descarregador em degraus apresenta um declive constante (1:0,75; $\theta = 53,13^\circ$). Na presente dissertação foram utilizados degraus de 8 e de 4 cm de altura no trecho de declive constante.

A bacia de dissipação de energia tem 5 m de comprimento e 1 m de largura. Foram instaladas 67 tomadas de pressão ao longo da bacia de dissipação com ligação a quadros manométricos com resolução de 1,0 mm.



Figura 1. Instalação experimental existente no LNEC: vista do descarregador em degraus, com soleira do tipo PKW, e da bacia de dissipação de energia.

2.2. Soleira descarregadora em teclado de piano

A soleira descarregadora em teclado de piano (PKW) (Fig. 2), é um caso particular de uma soleira em labirinto, com forma retangular em planta e que apresenta teclas com inclinações alternadas em relação à base, constituindo as teclas interiores e exteriores, respetivamente. O prolongamento da crista a montante ou a jusante da base é normalmente designado por projeção.

O elemento básico de uma soleira descarregadora do tipo PKW é definido como a unidade PKW e representa a menor extensão de uma estrutura completa, sendo o número de unidades definido por N_u . A soleira é composta por duas paredes laterais (*side wall: s*), uma tecla interior (*inlet key: i*) e duas metades de uma tecla exterior (*outlet key: o*). Os principais parâmetros que definem a geometria de uma soleira PKW são a largura total da soleira (W), o desenvolvimento total da crista (L), o comprimento total da soleira (B) e a altura total da soleira (P).

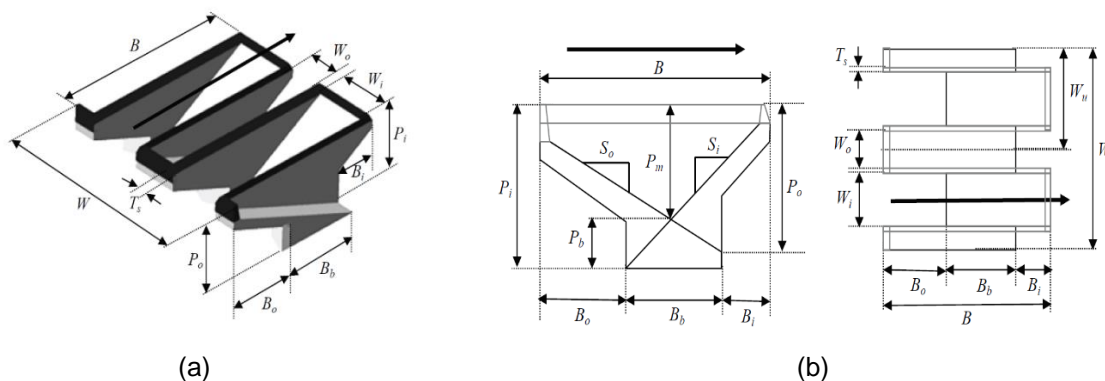


Figura 2. Principais grandezas de uma soleira descarregadora em teclado de piano: a) vista 3D; b) perfil e planta (adaptado de Pralong *et al.*, 2011).

Existem quatro tipos de soleiras descarregadoras do tipo PKW (Fig. 3): soleiras do tipo A (utilizada neste trabalho), que apresentam projeções a montante e a jusante; soleiras do tipo B, que apenas apresentam projeções a montante; soleiras do tipo C, que apenas possuem projeções a jusante; e soleiras do tipo D que, apesar de apresentarem o fundo inclinado, não possuem projeções.

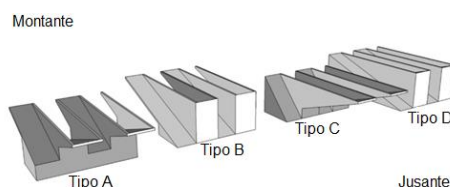


Figura 3. Representação esquemática dos quatro tipos de soleiras descarregadoras em teclado de piano (adaptado de Erpicum *et al.*, 2017).

A soleira descarregadora utilizada no presente estudo foi dimensionada de acordo com a proposta de Machiels (2012), no âmbito da dissertação de Reis (2015). Na Tabela 1 encontram-se as principais características da soleira descarregadora do tipo PKW dimensionada no âmbito da dissertação de Reis (2015).

Tabela 1. Características da soleira descarregadora do tipo PKW do presente estudo.

W_u	W	L	B	$\frac{B_o}{B_i}$	W_i	W_o	T_s	P	B_i	B_o	$\frac{W_i}{W_o}$	$\frac{P}{W_u}$	$\frac{2 T_s}{L}$	$\frac{L}{W}$
(m)	(m)	(m)	(m)		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)				
0,392	1,000	4,290	0,670	1,000	0,221	0,147	0,012	0,200	0,134	0,134	1,503	0,510	0,014	4,290

Nota: As grandezas incluídas na tabela são (ver Fig. 2): B - comprimento total da soleira do tipo PKW; B_i - comprimento da projeção de jusante; B_o - comprimento da projeção de montante; L - desenvolvimento total da crista; P - altura da soleira descarregadora do tipo PKW; T_s - espessura da parede lateral; W - largura total da soleira do tipo PKW; W_i - largura da tecla interior; W_o - largura da tecla exterior; W_u - largura da unidade PKW.

3. CURVA DE VAZÃO

Na Fig. 4 apresenta-se a curva de vazão obtida neste estudo, bem como a de Reis (2015) e de Pinto (2017), para a soleira descarregadora do tipo PKW, assim como a curva de vazão obtida por Matos (1999), Meireles (2004) e Cardoso (2007), para uma soleira descarregadora do tipo WES, instalada anteriormente na instalação experimental.

A curva de vazão obtida neste estudo é praticamente coincidente com as curvas de vazão obtidas por Reis (2015) e por Pinto (2017), como seria expectável. Analogamente aos estudos anteriores, verifica-se que o caudal escoado na soleira descarregadora do tipo PKW é consideravelmente superior ao escoado na soleira do tipo WES, em particular para pequenas cargas sobre a crista. Com efeito, naquele tipo de soleira obteve-se um caudal cerca de três vezes superior ao da soleira descarregadora do tipo WES, para uma carga sobre a crista de 5 cm, e aproximadamente o dobro do caudal escoado, para uma carga sobre a crista de 12 cm.

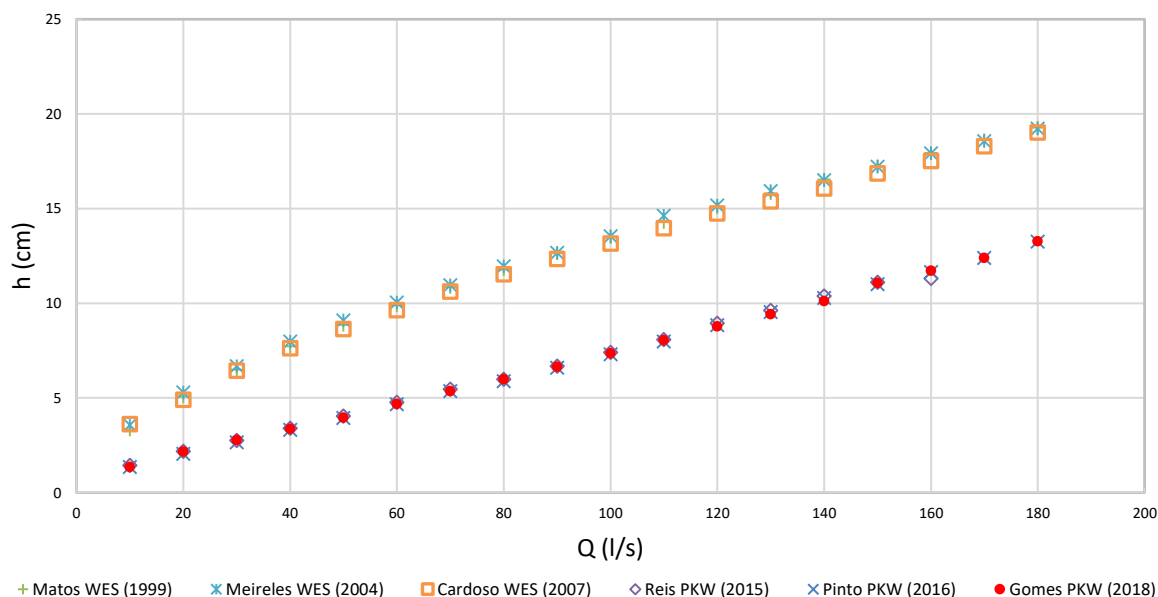


Figura 4. Curvas de vazão das soleiras descarregadoras em teclado de piano e do tipo WES.

4. DISSIPACÃO DE ENERGIA

4.1. Alturas conjugadas do ressalto e energia específica residual

A altura equivalente de água e a energia específica residual na secção de montante do ressalto hidráulico, no pé do descarregador, podem ser obtidas com base nas seguintes hipóteses (Meireles, 2004):

- hipótese A, em que se considera que na aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento entre a secção de montante e de jusante do ressalto hidráulico, a distribuição de pressões é hidrostática nas duas secções;
- hipótese B, em que se considera que na aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento entre a secção de montante e de jusante do ressalto hidráulico, a distribuição de pressões é hidrostática na secção de jusante do ressalto hidráulico e na secção imediatamente a montante do ressalto varia linearmente entre o valor nulo à superfície livre e o valor da altura piezométrica medido na soleira da bacia de dissipação.

Para a hipótese de distribuição de pressões hidrostática em ambas as secções do ressalto (hipótese A) a equação de conservação da quantidade de movimento é dada por (Matos, 1999, Meireles, 2004):

$$\gamma \frac{h_{mr}^2}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{mr}} = \gamma \frac{h_{jr}^2}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{jr}} \quad (1)$$

em que h_{jr} é a altura do escoamento na secção imediatamente a jusante do ressalto hidráulico, h_{mr} a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto, q o caudal unitário de água, α' o coeficiente de quantidade de movimento, γ o peso volúmico da água e ρ a massa volúmica da água.

Para a hipótese de distribuição de pressões linear, não hidrostática, na secção de montante do ressalto (hipótese B) a equação de conservação da quantidade de movimento é dada por (Meireles, 2004):

$$\gamma h_{mr} \frac{h_{mr}^{piez}}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{mr}} = \gamma \frac{h_{jr}^2}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{jr}} \quad (2)$$

em que h_{mr}^{piez} é a altura piezométrica medida na soleira da bacia de dissipação, na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico.

Para a localização do fim do ressalto hidráulico utilizou-se o critério proposto em Cardoso (2007), que se baseou na obtenção de um valor inferior a 5% do declive da altura piezométrica média na bacia de dissipação em função da distância.

Por outro lado, considera-se que a altura piezométrica imediatamente a montante do ressalto hidráulico corresponde ao valor máximo da altura piezométrica medida no trecho de impacto do escoamento proveniente do descarregador, para uma situação de ressalto hidráulico sem afogamento.

A altura equivalente de água a montante do ressalto hidráulico é obtida a partir da equação de conservação da quantidade de movimento (Equação (1) ou (2)).

Para a situação em que o ressalto se forma imediatamente a jusante do descarregador, a energia específica residual (E_r) no pé do descarregador pode ser estimada através das Equações (3), (4) e (5) (Manzanares, 1980, Yasuda e Ohtsu, 1999, 2003, *in* Meireles, 2004):

$$E_r = \beta h_{mr} + \alpha \frac{U_{mr}^2}{2g} \quad (3)$$

$$\beta = 1 + \frac{1}{\rho g q h_{mr}} \int_0^{h_{mr}} V \Delta p \, dy \quad (4)$$

$$U_{mr} = \frac{q}{h_{mr}} \quad (5)$$

em que g é a aceleração gravítica, h_{mr} a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico, q o caudal unitário de água, U_{mr} a velocidade média da água na secção imediatamente a montante do ressalto, V a velocidade da água à distância y da soleira (sendo y a coordenada medida segundo a normal à bacia de dissipação), α o coeficiente da energia cinética, β o coeficiente de Jaeger-Manzanares e Δp a diferença entre a pressão real e a correspondente à distribuição hidrostática, à distância y da soleira.

De acordo com Yasuda e Ohtsu (2003), a distribuição de velocidades obtida experimentalmente é calculada através da equação (*in* Meireles, 2004):

$$V = \frac{9}{8} U_{mr} \left(\frac{y}{h_{mr}} \right)^{1/8} \quad (6)$$

Considerando que a distribuição de pressões, na secção de montante do ressalto hidráulico, varia linearmente entre o valor nulo à superfície livre e o valor medido na soleira da bacia de dissipação, obtém-se Δp , à distância y da soleira, por meio da equação (Yasuda e Ohtsu 1999, 2003, in Meireles, 2004):

$$\Delta p = \rho g (h_{mr}^{piez} - h_{mr}) \left(1 - \frac{y}{h_{mr}}\right) \quad (7)$$

em que h_{mr}^{piez} é a altura piezométrica medida na soleira da bacia de dissipação, na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico e ρ a massa volúmica da água.

Meireles (2004) obteve valores dos coeficientes da energia cinética (α) e de quantidade de movimento (α') aproximadamente iguais à unidade, tendo sido utilizado $\alpha = \alpha' = 1$.

4.2. Altura equivalente de água na secção de montante do ressalto

Na Fig. 5 apresentam-se os valores da altura equivalente de água a montante do ressalto hidráulico para a hipótese A (distribuição de pressões hidrostática na secção de montante do ressalto – Equação (1)) e hipótese B (distribuição de pressões linear, não hidrostática, na secção de montante do ressalto – Equação (2)). Com base na análise da Fig. 5 formulam-se as seguintes observações:

- as alturas equivalentes de água na secção de montante do ressalto obtidas com degraus de 4 cm de altura são em geral ligeiramente inferiores às obtidas com degraus de 8 cm de altura (para idêntica soleira descarregadora).
- as alturas equivalentes de água na secção de montante do ressalto obtidas com soleira descarregadora do tipo PKW são ligeiramente inferiores às obtidas com soleira descarregadora do tipo WES (com degraus da mesma altura);
- para os resultados obtidos no presente estudo com soleira descarregadora do tipo PKW e com degraus de 4 e 8 cm de altura, obtém-se uma diferença relativa média de cerca de -3% e de -4% dos valores de altura equivalente de água a montante do ressalto para as hipóteses A e B, respetivamente;
- para os resultados obtidos com degraus de 4 cm no presente estudo (soleira do tipo PKW) e de Meireles (2004) (soleira do tipo WES), obtém-se uma diferença relativa média de cerca de -3% e de -6% dos valores de altura equivalente de água a montante do ressalto para as hipóteses A e B, respetivamente.

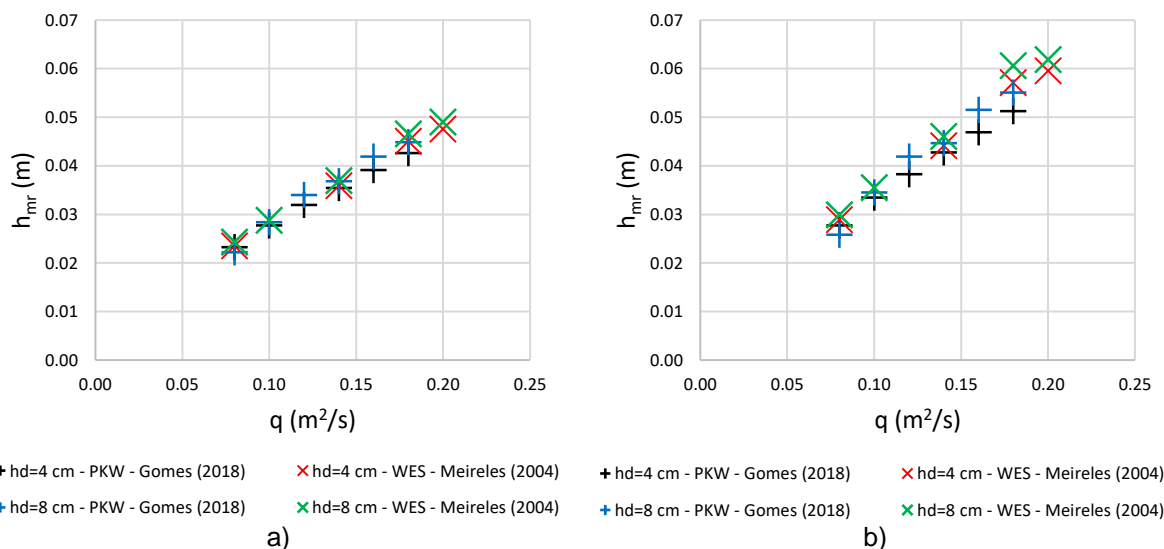


Figura 5. Altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico:
a) hipótese A; b) hipótese B.

Na Fig. 6 apresenta-se a energia específica residual calculada com base nas hipóteses A (Equações (1), (3) e (5), com $\beta = 1$, $\alpha = 1$ e $\alpha' = 1$) e B (Equações (2) e (3) a (7), com $\alpha = 1$ e $\alpha' = 1$). A análise desta figura permite formular as seguintes observações:

- a energia específica residual no pé do descarregador obtida com degraus de 4 cm de altura é em geral ligeiramente superior à obtida com degraus de 8 cm de altura (para idêntica soleira descarregadora);
- a energia específica residual no pé do descarregador obtida com soleira descarregadora do tipo PKW é em geral ligeiramente superior à obtida com soleira descarregadora do tipo WES (com degraus da mesma altura);
- para os resultados obtidos com degraus de 4 cm de altura, no presente estudo (soleira do tipo PKW) e por Meireles (2004) (soleira do tipo WES), obtém-se uma diferença relativa média de cerca de 3% e de 7% dos valores de energia específica residual no pé do descarregador para as hipóteses A e B, respetivamente.

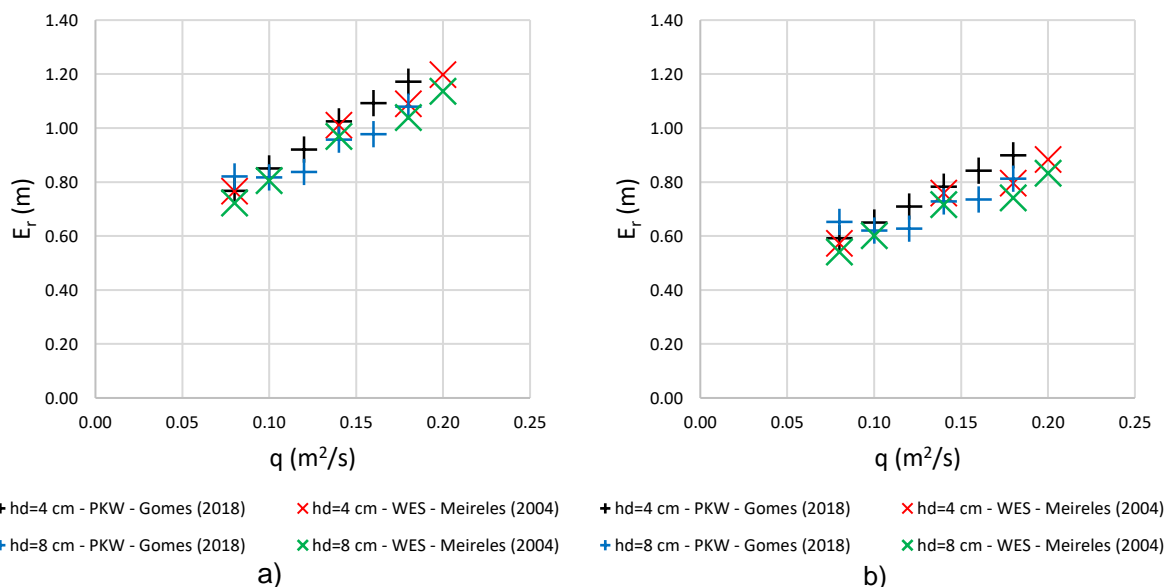


Figura 6. Energia específica residual: a) hipótese A; b) hipótese B.

Na Fig. 7 apresenta-se a relação entre a altura equivalente de água imediatamente a montante do ressalto hidráulico, obtida através das hipóteses A e B (h_{mrB}/h_{mrA}), em função da relação entre a altura crítica de escoamento e a altura dos degraus (h_c/h_d). Analogamente ao obtido por Meireles (2004), os valores da relação h_{mrB}/h_{mrA} praticamente não variam com h_c/h_d . A mesma conclusão é obtida para a relação entre os valores da energia específica residual (E_{rB}/E_{rA}).

As seguintes equações de regressão foram obtidas para a totalidade dos resultados em soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES:

$$\frac{h_{mrB}}{h_{mrA}} = 1,23 \quad (8)$$

$$\frac{E_{rB}}{E_{rA}} = 0,76 \quad (9)$$

em que E_{rA} é a energia específica residual na secção de montante do ressalto na hipótese A, E_{rB} a energia específica residual na secção de montante do ressalto na hipótese B, h_{mrA} a altura equivalente de água na secção de montante do ressalto na hipótese A e h_{mrB} a altura equivalente de água na secção de montante do ressalto na hipótese B.

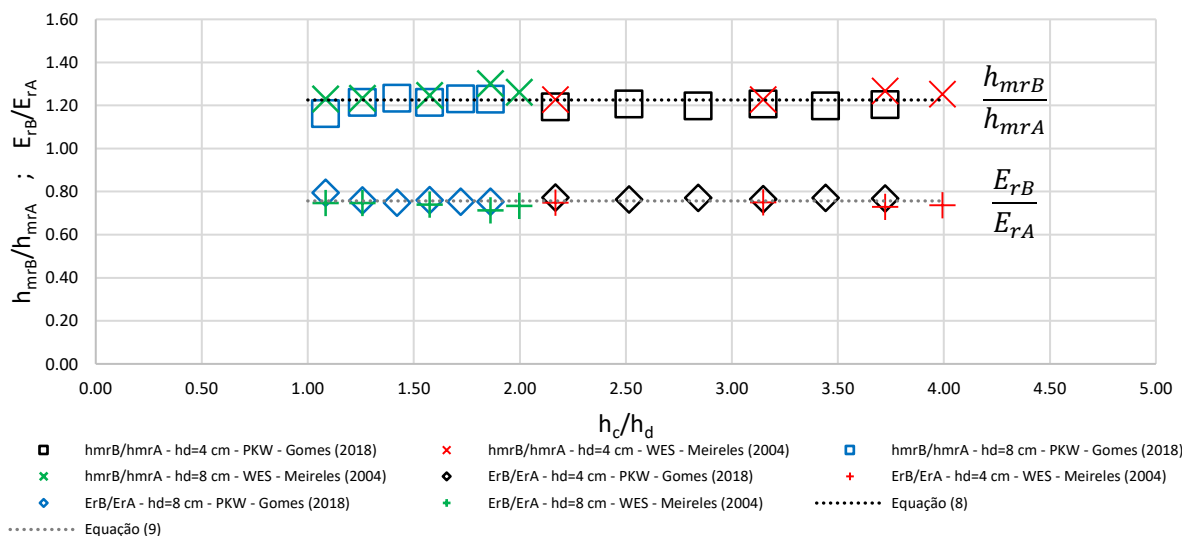


Figura 7. Influência da consideração das hipóteses A e B nos valores da altura equivalente de água e da energia específica residual.

Aplicando a hipótese A aos resultados obtidos no presente estudo e por Meireles (2004), verifica-se uma subestimação de cerca de 18% nos valores da altura equivalente de água e uma sobrestimação de cerca de 32% nos valores da energia específica residual, comparativamente aos valores obtidos considerando a hipótese B. Assim, a hipótese de distribuição hidrostática de pressões na secção imediatamente a montante do ressalto não se afigura adequada.

Para situações em que apenas é possível ter resultados da medição da altura de água a jusante do ressalto, afigura-se útil utilizar as Equações (8) e (9), que permitem estimar com maior rigor, na gama de valores de h_c/h_d analisados, a altura equivalente de água e a energia específica residual imediatamente a jusante de descarregadores de cheias em degraus com declive próximo do utilizado no presente estudo.

4.3. Perda de carga no descarregador

Na Fig. 8 apresentam-se os valores da perda de carga adimensionalizada pela altura crítica ($\Delta H/h_c$), em função da altura do descarregador adimensionalizada pela altura crítica (H_{desc}/h_c), de acordo com a hipótese B. A perda de carga total no descarregador é dada por:

$$\Delta H = E_{max} - E_r \quad (10)$$

sendo

$$E_{max} = H_{desc} + E_{crista} \quad (11)$$

e em que E_{crista} é a energia específica do escoamento no reservatório de entrada, medida em relação à crista da soleira descarregadora, E_{max} a energia específica máxima do escoamento, medida em relação à bacia de dissipação, E_r a energia específica residual no pé do descarregador, H_{desc} a altura do descarregador (distância na vertical, entre a crista da soleira descarregadora e a bacia de dissipação de energia) e ΔH a perda de carga total no descarregador.

Na instalação experimental do presente estudo, a altura do descarregador, desde a crista da soleira de entrada até à bacia de dissipação, é igual a 2,90 m para a soleira descarregadora do tipo WES e igual a 2,96 m para a soleira descarregadora do tipo PKW.

Os resultados mostram que a perda de carga total no descarregador com soleira descarregadora do tipo PKW ($h_d=4$ cm) é em geral ligeiramente inferior à obtida com soleira do tipo WES ($h_d=4$ cm) (diferença relativa média de cerca de -2% da perda de carga total, para a hipótese B), o que é expectável atendendo aos resultados apresentados para a energia específica residual. Por outro lado, a perda de carga total no descarregador com degraus de 4 cm de altura (soleira do tipo PKW) é em geral ligeiramente inferior à obtida com degraus de 8 cm de altura (soleira do tipo PKW) (diferença relativa média de cerca de -2% da perda de carga, para a hipótese B).

Para os resultados obtidos com soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES, obtiveram-se as seguintes equações de regressão, de acordo com a hipótese B:

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,90 \frac{H_{desc}}{h_c} - 2,71 ; R^2 = 0,994 \quad (\text{PKW}) \quad (12)$$

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,93 \frac{H_{desc}}{h_c} - 2,72 ; R^2 = 0,998 \quad (\text{WES}) \quad (13)$$

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,90 \frac{H_{desc}}{h_c} - 2,46 ; R^2 = 0,989 \quad (\text{PKW e WES}) \quad (14)$$

Afigura-se assim adequada a utilização de uma única expressão para estimar a perda de carga total no descarregador, independentemente do tipo de soleira e da altura dos degraus, na gama de valores de H_{desc}/h_c e h_c/h_d analisados.

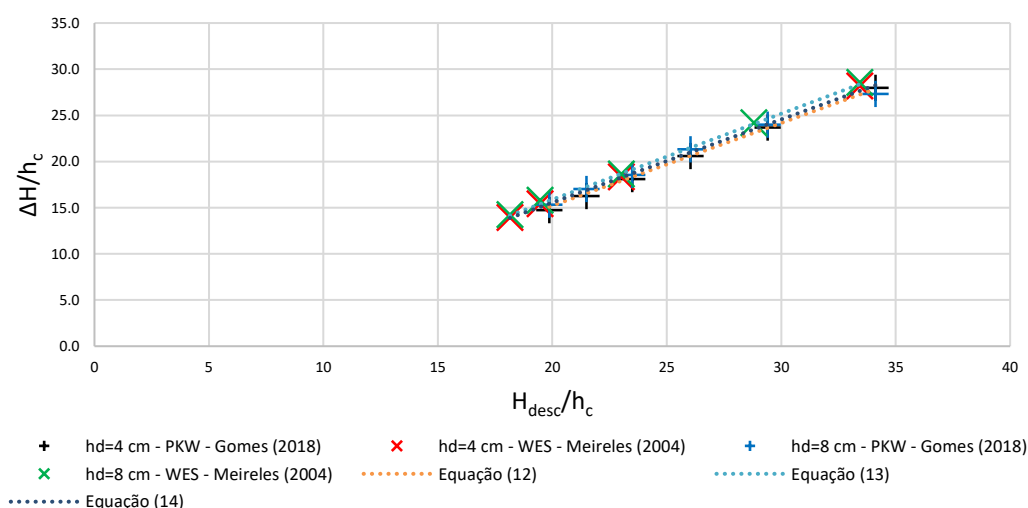


Figura 8. Perda de carga adimensionalizada pela altura crítica (hipótese B).



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

5. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que a curva de vazão obtida neste estudo é próxima da obtida em estudos anteriores, conduzidos na mesma instalação experimental. Verifica-se que o caudal escoado sobre a soleira descarregadora do tipo PKW é consideravelmente superior ao escoado sobre uma soleira do tipo WES, para idêntica largura do descarregador e carga sobre a crista, nomeadamente cerca de duas a três vezes superior, para um valor elevado ou reduzido da carga sobre a crista, respetivamente.

Relativamente à perda de carga total no descarregador, os resultados obtidos evidenciam uma ligeiramente menor capacidade de dissipação de energia no descarregador com degraus de 4 cm de altura em relação à obtida com degraus de 8 cm de altura e, igualmente, valores de dissipação de energia ligeiramente inferiores para a soleira do tipo PKW comparativamente à soleira do tipo WES. Contudo, as diferenças relativas são muito pequenas.

Por fim, apresentam-se expressões adimensionais que permitem estimar a perda de carga em descarregadores em degraus com soleiras descarregadoras do tipo WES ou PKW.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardoso, G. (2007). *Ressalto hidráulico em bacias de dissipação com acessório a jusante de descarregadores de cheias em degraus. Estudo experimental*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. & Piroton, M. (2017). Hydraulics of Piano Key Weirs: A review. *Labyrinth and Piano Key Weirs III PKW 2017*, Erpicum et al. (Eds), pp. 27-36.

Gomes, R. (2018). *Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Machiels, O. (2012). *Experimental study of the hydraulic behaviour of piano key weirs*. Ph.D. thesis, University of Liège.

Manzanares, A. A. (1980). *Hidráulica Geral*. Técnica, AEIST, Vol. 2, Lisboa (Portugal).

Matos, J. (1999). *Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus*. Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Meireles, I. (2004). *Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores em degraus*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Meireles, I. (2011). *Hidráulica dos descarregadores em degraus: estudo experimental-numérico-teórico*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

Pinto, M. (2017). *Dissipação de energia em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano: estudo experimental*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Pirotton, M., Boillat, J-L., Leite Ribeiro M. & Schleiss, A. (2011). A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. *Labyrinth and Piano Key Weirs PKW 2011*, pp. 271-278.

Reis, M. (2015). *Estudo experimental do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Renna, F. (2004). *Caratterizzazione Fenomenologica del Moto di un Fluido Bifasico Lungo Scaricatori a Gradini*. Tese de doutoramento, Politécnico de Bari, Cosenza.

Yasuda, Y., Ohtsu, I. (1999). Flow resistance of skimming flow in stepped channels. *Proc. 28th IAHR Congress*, Theme B, B14, Graz, Áustria.

Yasuda, Y., Ohtsu, I. (2003). Effect of step cavity area on flow characteristics of skimming flows on stepped chutes. *Proc. 30th IAHR Congress*, Theme D, IAHR, Salónica, Grécia, pp. 703-710.