

# ENERGIA ESPECÍFICA RESIDUAL DO ESCOAMENTO EM DESCARREGADORES DE CHEIAS EM DEGRAUS. APLICAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO

Inês MEIRELES

*Equiparada a Assistente do 1º Triénio, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro – Instituto Politécnico de Setúbal, Rua Stinville, nº14 Parque  
Empresarial do Barreiro, Quimiparque, 2830-144 Barreiro +351.21.2064660, ines.meireles@estbarreiro.ips.pt*

Jorge MATOS

*Prof. Auxiliar, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, +351.21.8418145, jm@civil.ist.utl.pt*

José FALCÃO de MELO

*Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 1700-066 Lisboa, +351.21.8443000, jfmelo@lnec.pt*

## RESUMO

A construção de descarregadores de cheias em degraus tem vindo a ser fortemente implementada nos últimos anos, o que em larga medida se deve à utilização da técnica recente de betão compactado por cilindros (BCC). De um modo geral, em barragens de BCC os descarregadores de cheias em degraus permitem reduções de custos significativas e apresentam ainda as vantagens de serem de mais simples execução e de requererem menor tempo de construção.

Para além da economia e rapidez de construção que esta técnica possibilita, a dissipação de energia ao longo do descarregador é significativamente maior do que se este for convencional, o que permite reduzir as dimensões da estrutura de dissipação de energia a jusante, ou mesmo, nalguns casos, eliminá-la.

Em diversos trabalhos de investigação desenvolvidos até ao presente, a estimação da energia específica residual tem sido efectuada com base na medição da altura do escoamento a jusante do ressalto hidráulico na bacia de dissipação de energia, junto do pé do descarregador, e na posterior aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento para determinar a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto. Na aplicação daquela equação, admite-se como válida a hipótese de que a distribuição de pressões na secção de montante do ressalto é hidrostática, o que constitui uma simplificação da realidade.

Com o objectivo de verificar a validade daquela hipótese, efectuaram-se ensaios experimentais num descarregador em degraus construído no pavilhão de modelos exteriores do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Para diversos valores do caudal a que corresponde o escoamento deslizante sobre turbilhões, procedeu-se à medição de alturas piezométricas na bacia de dissipação de energia, em particular próximo do pé do descarregador.

A análise comparativa dos valores obtidos considerando por um lado a hipótese simplificativa de distribuição de pressões hidrostática e, por outro, os valores da altura piezométrica medidos na soleira da instalação experimental, permitiu verificar a existência de diferenças da ordem de 17% entre os valores da altura equivalente de água e de 30% entre os valores da energia específica residual.

Palavras-chave: descarregador de cheias em degraus, escoamento deslizante sobre turbilhões, dissipação de energia, energia específica residual, ressalto hidráulico.

## 1 - INTRODUÇÃO

A constante evolução tecnológica tem permitido construir barragens de maior dimensão e descarregadores de cheia com maior capacidade de vazão. Para que não ocorram danos na própria estrutura descarregadora e junto do pé da barragem, torna-se necessário dissipar a energia do escoamento, usualmente a jusante dos descarregadores de cheias (e. g. bacias de dissipação de energia, jactos cruzados, dissipadores em concha de rolo e estruturas de dissipação por impacto) ou ao longo do descarregador (e.g. descarregadores em degraus).

Os descarregadores de cheias em degraus provocam maior dissipação de energia do que os descarregadores com paramento convencional, permitindo em alguns casos eliminar ou reduzir significativamente a dimensão da estrutura de dissipação de energia a jusante.

A crescente inovação nas técnicas construtivas, em especial a técnica de BCC (betão compactado por cilindros) tornou atractiva a construção de descarregadores de cheias em degraus. A maior economia e rapidez de construção aliadas à maior dissipação de energia em relação a descarregadores convencionais contribuiu decisivamente para a sua crescente expansão (DUNSTAN 1996, 1999, CHANSON 2002).

Em diversos trabalhos de investigação desenvolvidos até ao presente (e.g., DIEZ-CASCON et al. 1991, TOZZI, 1992, 1994, PEGRAM et al. 1999), a estimação da energia específica residual tem sido efectuada com base na medição da altura do escoamento a jusante do ressalto hidráulico que se forma na bacia de dissipação de energia, junto do pé do descarregador, e na posterior aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento para determinar a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto. Na aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento admite-se como válida a hipótese de que a distribuição de pressões na secção de montante do ressalto é hidrostática, o que constitui uma simplificação da realidade.

A partir da medição da altura piezométrica a jusante de um descarregador com paramento convencional e declive de 1:0.75, dotado de uma curva de concordância a montante da bacia de dissipação de energia, TOZZI (1992) obteve elevados valores da pressão na tomada localizada na secção de jusante da curva de concordância, independentemente da posição de início do ressalto, tendo concluído não ser válida a distribuição hidrostática de pressões naquela secção. Embora TOZZI (1992) não tenha analisado aquela hipótese para o escoamento a jusante de descarregadores em degraus, admite conclusões análogas às obtidas para o descarregador com paramento convencional.

Embora YASUDA e OHTSU (1999, 2003) tenham procedido à medição da altura piezométrica na soleira da bacia de dissipação e aplicado a equação de conservação de quantidade de movimento atendendo à distribuição não hidrostática de pressões, aqueles autores não comparam os resultados obtidos com os que se obteriam a partir da medição da altura do escoamento a jusante do ressalto, considerando a hipótese de distribuição de pressões hidrostática.

Afigura-se assim importante comparar os valores da altura equivalente de água e da energia específica residual que se obtêm considerando, por um lado, a hipótese simplificativa de distribuição de pressões hidrostática (hipótese 1) e, por outro, os valores da altura piezométrica medidos na soleira da bacia de dissipação (hipótese 2), por forma a aferir a validade de tal simplificação e a encontrar a relação entre os valores obtidos para ambas as hipóteses.

## 2 - INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS

O presente estudo tem como base ensaios realizados num descarregador em degraus construído no pavilhão de modelos exteriores do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O descarregador tem um declive de 1:0,75 e 1,00 m de largura. A diferença de cotas entre a crista do descarregador e a soleira da bacia de dissipação é de 2,90 m. Informação adicional sobre a instalação pode ser obtida em MATOS (1999).

Os ensaios experimentais, efectuados para caudais compreendidos entre 80 e 200 l/s e alturas dos degraus do descarregador iguais a 4 e 8 cm, consistiram na medição de alturas piezométricas (valor médio temporal) ao longo da bacia de dissipação a jusante do descarregador, na situação de ocorrência de ressalto hidráulico imediatamente a jusante do pé do descarregador.

Procedeu-se à medição de alturas piezométricas em quarenta tomadas de pressão, quinze das quais se localizam na zona de impacto do escoamento na bacia de dissipação, para a gama de caudais analisados. Vinte e oito tomadas de pressão estão localizadas no eixo de simetria da bacia de dissipação (tomadas centrais), e doze localizam-se a cerca de 3 cm desse eixo, na zona de impacto do escoamento na bacia de dissipação (Figura 1).

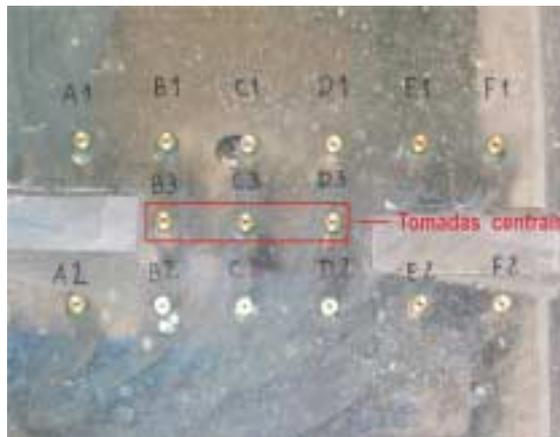


Figura 1 – Tomadas de pressão localizadas na zona de impacto do escoamento na bacia de dissipação.

A análise dos resultados permite verificar que:

- as alturas piezométricas aumentam em geral com o caudal;
- as alturas piezométricas são praticamente independentes da altura dos degraus do descarregador;
- as alturas piezométricas aumentam consideravelmente na zona de impacto do escoamento, atingindo valores claramente superiores aos correspondentes à distribuição hidrostática de pressões.

A título indicativo apresentam-se, nas Figuras 2 a 4, as alturas piezométricas em função do caudal unitário para todos os caudais estudados e  $h_d$  igual a 8 cm e para os caudais de 80 l/s e 180 l/s e  $h_d$  igual a 4 e 8 cm. Os valores assinalados como “tomadas centrais” são os obtidos nas tomadas

situadas no eixo de simetria da bacia de dissipação enquanto que os pontos assinalados como “outras tomadas” são obtidos nas doze tomadas localizadas de um e de outro lado deste eixo.

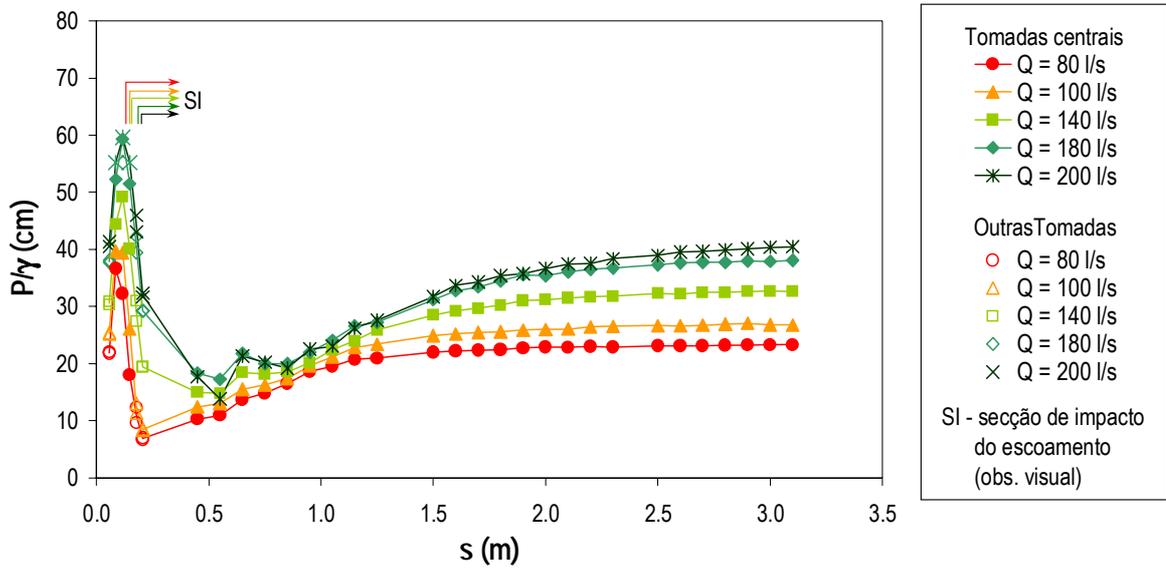


Figura 2 – Ressalto hidráulico. Alturas piezométricas para  $h_d = 8$  cm.

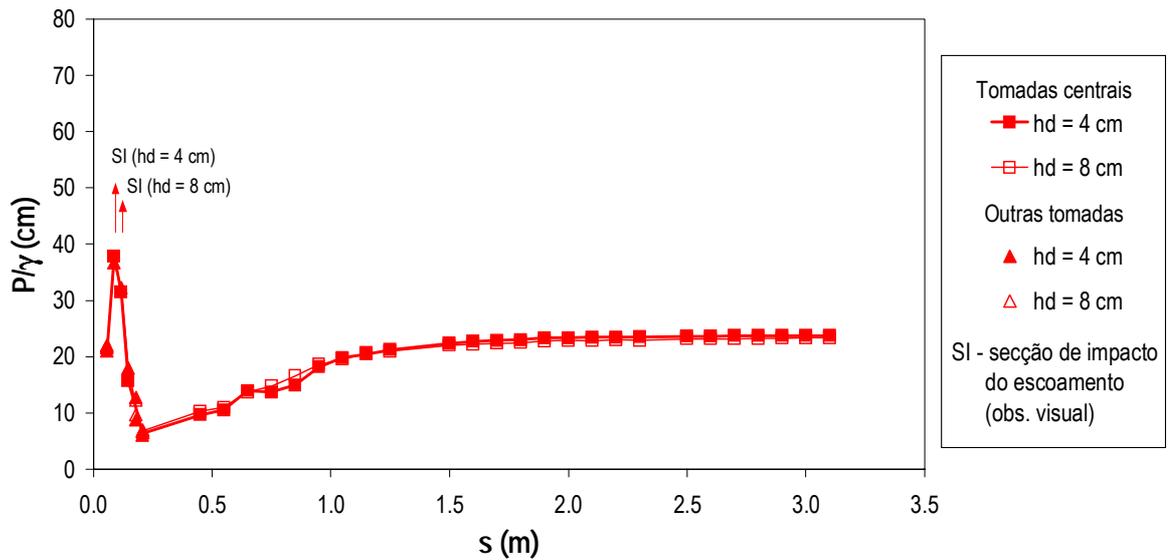


Figura 3 – Ressalto hidráulico. Alturas piezométricas para  $Q = 80$  l/s.

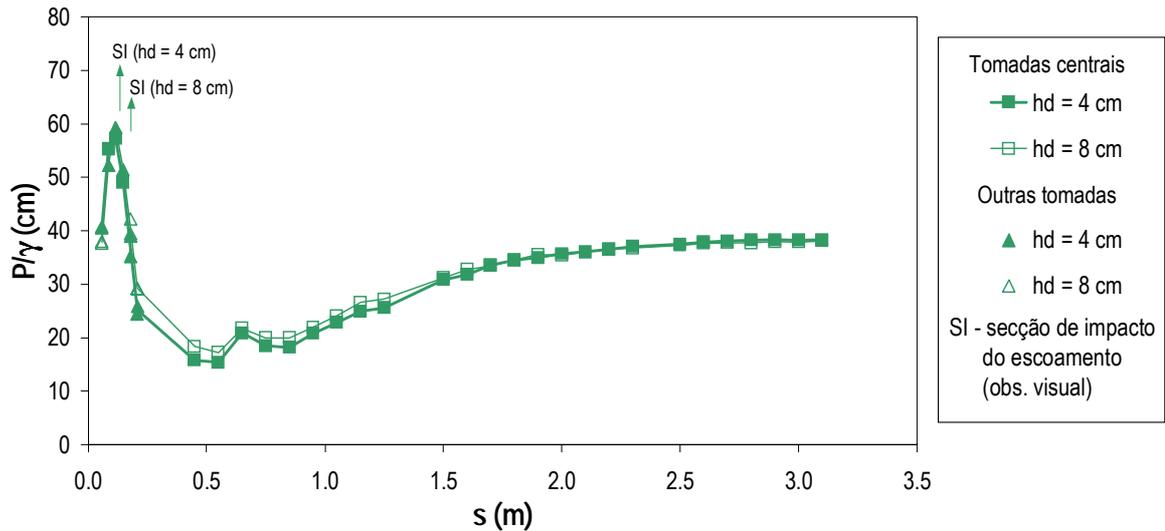


Figura 4 – Ressalto hidráulico. Alturas piezométricas para  $Q = 180$  l/s.

### 3 - ALTURA EQUIVALENTE DE ÁGUA E ENERGIA ESPECÍFICA RESIDUAL. ANÁLISE COMPARATIVA

Por aplicação da equação de conservação de quantidade de movimento ao volume de controlo delimitado pelas secções de montante e jusante do ressalto hidráulico, considerando que a distribuição de pressões é hidrostática em ambas as secções (hipótese 1), obtém-se a equação clássica do ressalto hidráulico (MATOS e QUINTELA, 1996)

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

em que:

- $\gamma$  - peso volúmico da água ( $N/m^3$ );
- $b$  - largura do descarregador (m);
- $h_{mr}$  - altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto (m);
- $\alpha'$  - coeficiente de quantidade de movimento (-);
- $\rho$  - massa volúmica da água ( $kg/m^3$ );
- $Q$  - caudal de água ( $m^3/s$ );
- $h_{jr}$  - altura do escoamento na secção imediatamente a jusante do ressalto (m).

Se se admitir que a distribuição de pressões, na secção de montante do ressalto, varia linearmente entre o valor nulo à superfície livre e o valor correspondente à altura piezométrica medida na soleira da bacia,  $h_{mr}^{piez}$  (hipótese 2), a equação da conservação da quantidade de movimento é dada por

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

Atendendo a que o ressalto se forma imediatamente a jusante do descarregador, a energia específica residual no pé do descarregador pode ser estimada por (YASUDA e OHTSU 2003)

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

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

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

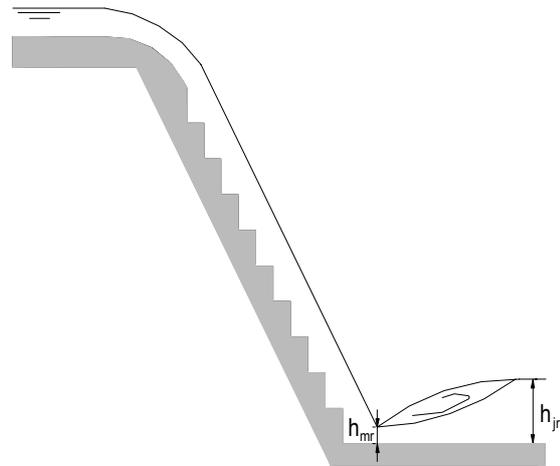


Figura 5 – Esquema do ressalto hidráulico.

em que:

- $E_r$  - energia específica residual (m);
- $\alpha$  - coeficiente da energia cinética (-);
- $U_{mr}$  - velocidade média da água na secção imediatamente a montante do ressalto (m/s);
- $g$  - aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);
- $q$  - caudal de água por unidade de largura (m<sup>2</sup>/s);
- $u$  - velocidade da água à distância  $y$  da soleira (m/s);
- $\Delta p$  - diferença entre a pressão real e a correspondente à distribuição hidrostática, à distância  $y$  da soleira (Pa);
- $y$  - coordenada medida segundo a normal à bacia de dissipação (m).

De acordo com YASUDA e OHTSU (1999, 2003) a distribuição de velocidades obtida experimentalmente é representada pela seguinte expressão:

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

Considerando que a distribuição de pressões, na secção de montante do ressalto, varia linearmente entre o valor nulo à superfície livre ( $p=0$ ) e o valor medido na soleira da bacia ( $p = \rho g h_{mr}^{piez}$ ), obtém-se (YASUDA e OHTSU 1999, 2003):

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

Da aplicação das expressões anteriores, admitindo simplificadaamente que  $\alpha = \alpha' = 1$ , observa-se que não há grandes variações entre os valores correspondentes a  $h_d$  igual a 4 ou 8 cm, mas que há diferenças apreciáveis entre os valores da altura equivalente de água e da energia específica residual nas hipóteses 1 ou 2 (Figura 6 e Figura 7).

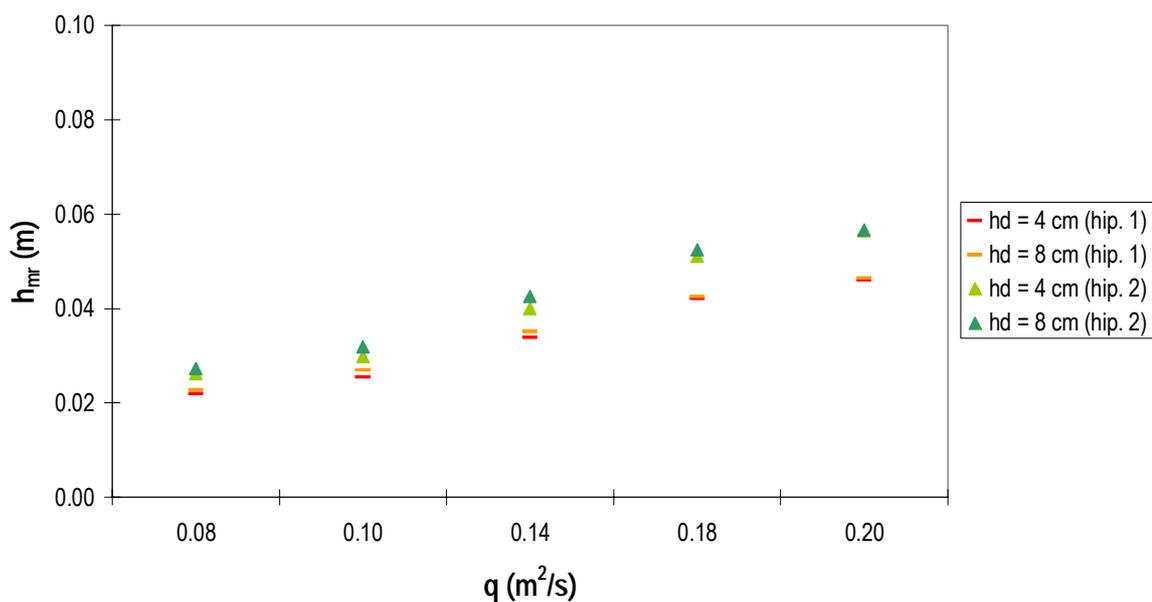


Figura 6 – Altura equivalente de água imediatamente a montante do ressalto.

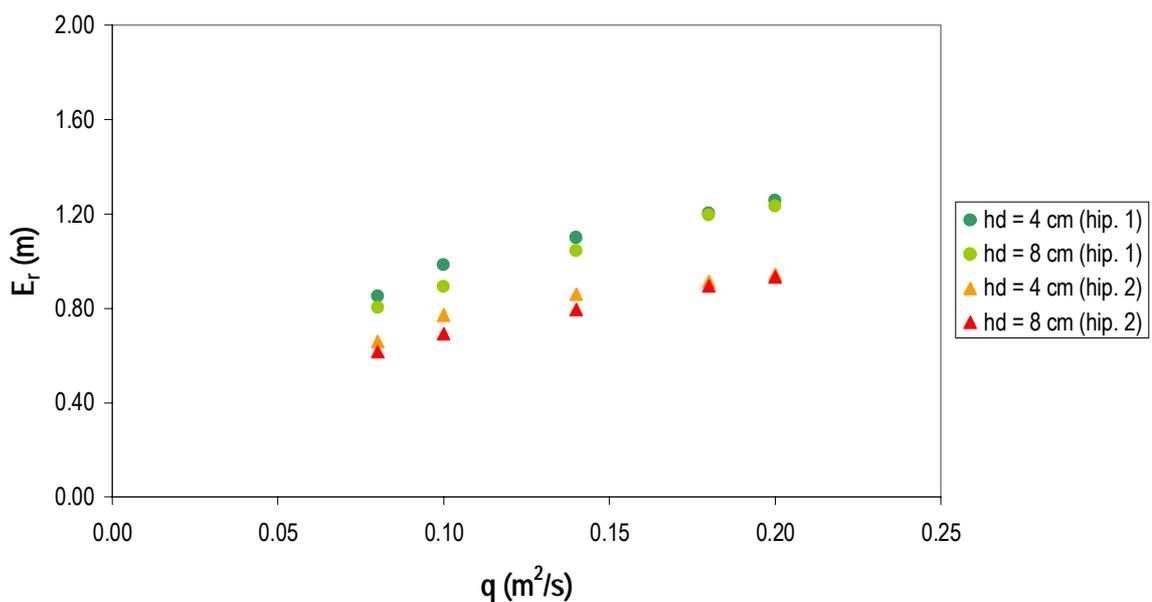


Figura 7 – Energia específica residual, imediatamente a montante do ressalto.

Ao considerar-se que a distribuição de pressões na secção de montante do ressalto hidráulico é hidrostática, em vez de se considerar a altura piezométrica na soleira da bacia de dissipação, os valores da altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico são subestimados em 17 % e os valores da energia específica na mesma secção são sobrestimados em cerca de 30 % (Figura 8).

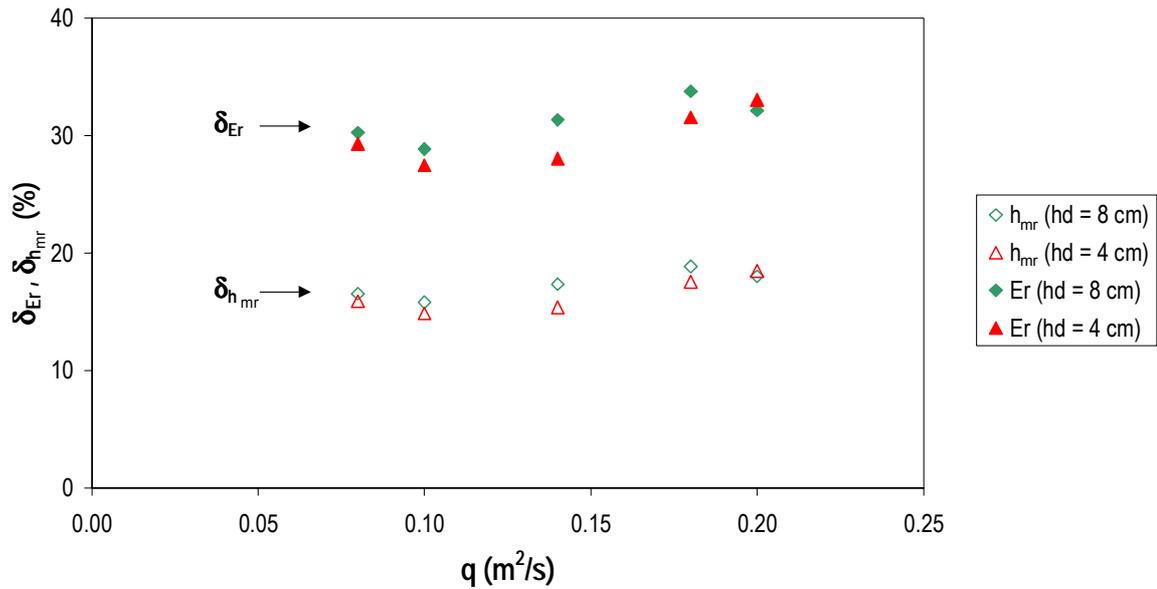


Figura 8 – Diferenças relativas da altura equivalente de água e da energia específica residual considerando ou não a distribuição de pressões hidrostática.

Regista-se que a relação entre os valores da altura equivalente de água imediatamente a jusante do descarregador, para as hipóteses 1 e 2, assim como a relação entre os respectivos valores da energia específica residual, são praticamente independentes da altura crítica ( $h_c$ ) e da altura dos degraus ( $h_d$ ), como ilustra a Figura 9, que inclui as equações de regressão

$$\frac{h_{mr_2}}{h_{mr_1}} = 1.20 \quad (8)$$

$$\frac{E_{r_2}}{E_{r_1}} = 0.77 \quad (9)$$

em que:

- $h_{mr_1}$  - altura equivalente de água no pé do descarregador na hipótese 1 (m);
- $h_{mr_2}$  - altura equivalente de água no pé do descarregador na hipótese 2 (m);
- $E_{r_1}$  - energia específica residual, no pé do descarregador, na hipótese 1 (m);
- $E_{r_2}$  - energia específica residual, no pé do descarregador, na hipótese 2 (m).

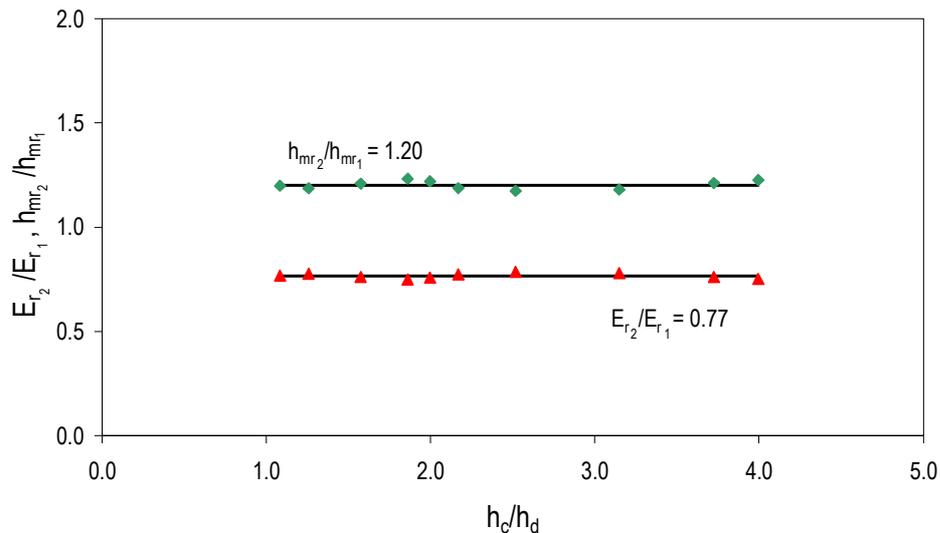


Figura 9 – Relações entre a altura equivalente de água e a energia específica no pé do descarregador para as hipóteses 1 e 2, considerando ou não a distribuição hidrostática de pressões.

A aplicação das Eq. (8) e (9) permitirá estimar com maior rigor a altura equivalente de água e a energia específica imediatamente a jusante de descarregadores de cheias em degraus com declive próximo do analisado no presente estudo, para os quais seja apenas possível ter resultados da medição da altura de água a jusante do ressalto.

#### 4 - CONCLUSÃO

Ensaio experimentais levados a cabo num descarregador em degraus permitiram confirmar que as alturas piezométricas medidas junto da soleira da bacia de dissipação na zona de impacto do escoamento atingem valores claramente superiores aos que se obteriam considerando a hipótese de distribuição de pressões hidrostática na secção de montante do ressalto hidráulico.

Considerando a lei hidrostática de pressões na secção de montante do ressalto que se forma na bacia de dissipação, imediatamente a jusante do descarregador, verifica-se uma subestimação de cerca de 17% nos valores da altura equivalente de água e uma sobrestimação de cerca de 30% nos valores da energia específica residual, comparativamente aos que se obteriam considerando os valores da altura piezométrica medidos na soleira daquela secção.

Propõem-se equações que permitem estimar com maior rigor a altura equivalente de água e a energia específica imediatamente a jusante de descarregadores de cheias em degraus com declive próximo do analisado no presente estudo, para os quais seja apenas possível ter resultados da medição da altura do escoamento a jusante do ressalto.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer o apoio concedido pelo Instituto da Água (INAG) e pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) à construção e posterior adaptação da instalação experimental construída no âmbito do Projecto “Descarregadores de Barragens em Degraus”.

## SIMBOLOGIA

$b$	-	largura do descarregador (m);
$E_r$	-	energia específica residual (m);
$E_{r_1}$	-	energia específica residual na hipótese 1 (m);
$E_{r_2}$	-	energia específica residual na hipótese 2 (m);
$g$	-	aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
$h_c$	-	altura crítica (m);
$h_d$	-	altura do degrau (m);
$h_{jr}$	-	altura do escoamento na secção imediatamente a jusante do ressalto (m);
$h_{mr}$	-	altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto (m);
$h_{mr}^{piez}$	-	altura piezométrica na soleira da bacia de dissipação, na secção imediatamente a montante do ressalto (m);
$h_{mr_1}$	-	altura equivalente de água no pé do descarregador na hipótese 1 (m);
$h_{mr_2}$	-	altura equivalente de água no pé do descarregador na hipótese 2 (m);
$p$	-	pressão relativa (Pa);
$q$	-	caudal de água por unidade de largura ( $m^2/s$ );
$Q$	-	caudal de água ( $m^3/s$ );
$s$	-	coordenada medida segundo a soleira da bacia de dissipação (m);
$u$	-	velocidade da água à distância $y$ da soleira (m/s);
$U_{mr}$	-	velocidade média da água na secção imediatamente a montante do ressalto (m/s);
$y$	-	coordenada medida segundo a normal à bacia de dissipação (m);
$\alpha$	-	coeficiente de energia cinética (-);
$\alpha'$	-	coeficiente de quantidade de movimento (-);
$\rho$	-	massa volúmica da água ( $kg/m^3$ );
$\gamma$	-	peso volúmico da água ( $N/m^3$ );
$\delta_{Er}$	-	diferença relativa da altura equivalente de água considerando ou não a distribuição de pressões hidrostática (-);
$\delta_h$	-	diferença relativa da energia específica residual considerando ou não a distribuição hidrostática de pressões (-);
$\Delta p$	-	diferença entre a pressão real e a correspondente à distribuição hidrostática, à distância $y$ da soleira (Pa).

## BIBLIOGRAFIA

- CHANSON, H. – *The hydraulics of stepped chutes and spillways*, Balkema, Holanda, 2002.
- DIEZ-CASCON, J., BLANCO, J.L., REVILLA, J. e GARCIA, R. - “Studies on the hydraulic behaviour of stepped spillways”. *Water Power & Dam Construction*, **43**, 9, 1991, pp. 22-26.
- DUNSTAN, M. R. H. - “The state-of-the-art of RCC dams”, in *Proc. 1<sup>as</sup> Conferências Portuguesas sobre barragens de betão compactado com cilindros (BCC)*, Lisboa (Portugal), Nov. 1996, 17 pp.
- DUNSTAN, M. R. H. – “Recent developments in RCC dams”. *Int. Journal on Hydropower & Dams*, Mar., 1999, pp. 40-45.
- MATOS, J. – *Emulsão de Ar e Dissipação de Energia do Escoamento em Descarregadores em Degraus*. Dissertação de Doutoramento, IST, Lisboa (Portugal), 1999.
- MATOS, J. e QUINTELA, A. - “Emulsão de ar e energia específica residual do escoamento em descarregadores de cheias em degraus”, in *Proc. 3<sup>o</sup> Congresso Nacional da Água*, Lisboa (Portugal), Vol. II, 1996, pp. 495-503.
- PEGRAM, G., OFFICER, A., MOTTRAM, S. – “Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **125**, 4, 1999, pp. 361-368.
- TOZZI, M.J. - “Residual energy in stepped spillways”. *Water Power & Dam Construction*, Maio 1994, pp. 32-34,
- TOZZI, M.J. - *Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus*. Tese de doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Brasil), 1992.
- YASUDA, Y.; OHTSU, I. - “Flow resistance in skimming flow in stepped channels”, in *Proc. 28<sup>th</sup> IAHR Congress* (CD-ROM), Theme B, Graz (Austria), 1999.
- YASUDA, Y.; OHTSU, I. – “Effect of step cavity area on flow characteristics of skimming flows on stepped chutes”, *Proc. 30<sup>th</sup> IAHR Congress* (CD-ROM), Theme D, Salónica (Grécia), 24-29 Agost. 2003, pp. 703 – 710.