



7, 8 e 9  
Março 2018  
ÉVORA  
Évora Hotel

GESTÃO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS:  
**NOVOS  
DESAFIOS**

## ENSAIOS HIDRÁULICOS EM MODELO REDUZIDO DOS DESCARREGADORES DE CHEIAS DA BARRAGEM DE ALTO TÂMEGA

António, MURALHA<sup>1</sup>; Elsa, ALVES<sup>2</sup>; Miguel, RAMIREZ<sup>3</sup>; Felix, HERNANDO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa,  
amuralha@lnec.pt, 218443442

<sup>2</sup> Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa,  
ealves@lnec.pt, 218443636

<sup>3</sup> Engenheiro Civil, Iberdrola, Tomás Redondo 1, 28033 Madrid,  
mrru@iberdrola.es, (+34) 917842593

<sup>4</sup> Responsável da Engenharia Civil, Iberdrola, Tomás Redondo 1, 28033 Madrid,  
fhernando@iberdrola.es, (+34) 917842534

### Resumo

A barragem de Alto Tâmega, é uma barragem de betão do tipo abóbada de dupla curvatura com encontros em perfil de gravidade com 107,5 m de altura máxima. A albufeira criada irá ter uma capacidade de 131,71 Mm<sup>3</sup> para o nível de pleno armazenamento.

A descarga dos caudais de cheia é feita através de dois descarregadores de cheias localizados junto aos encontros da barragem. Ambos os descarregadores são constituídos por dois vãos independentes controlados por comportas, que se desenvolvem ao longo de canais escavados na rocha terminando numa estrutura terminal em salto de esquí.

Os descarregadores foram projetados para uma cheia com um período de retorno de 10 000 anos a que corresponde um caudal total de 1 826 m<sup>3</sup>/s, sendo descarregados 913 m<sup>3</sup>/s em cada um dos descarregadores para o nível de máxima cheia.

Para a análise do funcionamento dos descarregadores de cheias foram realizados estudos em modelo reduzido e em modelo numérico que permitiram verificar as condições de escoamento ao longo dos canais dos descarregadores e otimizar as formas das estruturas de saída.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados dos estudos em modelo físico e numérico, designadamente das alterações nas estruturas de saída dos descarregadores, incluindo a análise através de fotogrametria da erosão causada pelo impacto dos jatos no leito do rio.

**Palavras-chave:** Descarregador de Cheias; Modelo Físico; Modelo Numérico; Cavidade de Erosão; Fotogrametria

**Tema:** Hidrologia, Hidráulica Fluvial e Obras Hidráulicas.



7, 8 e 9  
Março 2018  
ÉVORA  
Évora Hotel

GESTÃO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS:  
**NOVOS  
DESAFIOS**

## 1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento hidroelétrico de Alto Tâmega, cuja construção já teve início, localiza-se na região Norte de Portugal. Quando concluído, irá fazer parte do Sistema Eletroprodutor do Tâmega juntamente com as barragens de Gouvães e de Daivões, a ser explorado pela Iberdrola. O aproveitamento de Alto Tâmega é constituído pela barragem, central de pé de barragem, com uma capacidade instalada de 160 MW, e respetivos órgãos segurança hidráulica operacional: dois descarregadores de cheias e uma descarga de fundo.

O estudo hidráulico dos descarregadores de cheias contemplou estudos em modelo numérico e em modelo físico reduzido, construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O estudo em modelo reduzido teve como objetivos principais a caracterização do funcionamento hidráulico dos dois descarregadores e o melhoramento das formas de projeto de modo a minimizar as erosões causadas pelos jactos lançados pelos descarregadores, e a análise do funcionamento dos descarregadores de cheias com a central bem como as regras de exploração.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados do estudo das formas alternativas das estruturas de saída dos dois descarregadores em modelo físico e em modelo numérico. A comparação do funcionamento das diferentes formas estudadas baseou-se na caracterização das cavidades de erosão criadas pelos diferentes jactos. Para este efeito foi utilizada a técnica de fotogrametria que permitiu gerar uma superfície tridimensional do leito do rio após cada ensaio em modelo físico e a posterior análise comparativa.

De seguida, na secção 2, são apresentadas as características da barragem de Alto Tâmega e dos seus dois descarregadores de cheias, e na secção 3 descreve-se o modelo físico utilizado para a realização do estudo. Os principais resultados do estudo das formas de saída dos descarregadores são apresentados na secção 4. Por fim, na secção 5 encontram-se as principais conclusões do estudo.

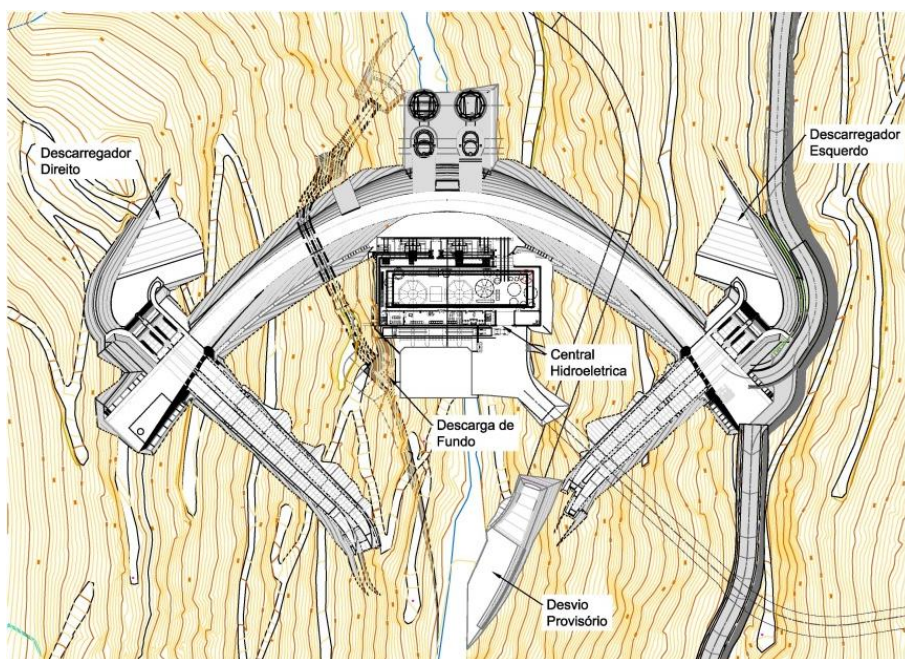
## 2. A BARRAGEM DE ALTO TÂMEGA

A barragem de Alto Tâmega, localizada no rio Tâmega, é uma barragem de betão do tipo abóbada de dupla curvatura com encontros em perfil de gravidade com 107,5 m de altura máxima. O coroamento situado à cota (318,00) desenvolve-se ao longo de 332,0 m. A albufeira criada irá ter uma capacidade de 131,71 Mm<sup>3</sup> para o nível de pleno armazenamento (NPA) situado à cota (315,00).

A descarga dos caudais de cheias é feita através dos dois descarregadores de cheias localizados junto aos encontros da barragem, Figura 1. Os dois descarregadores foram projetados para uma cheia com um período de retorno de 10 000 anos a que corresponde um caudal total de 1 826 m<sup>3</sup>/s sendo descarregados 913 m<sup>3</sup>/s em cada um dos descarregadores para o nível de máxima cheia (NMC) à cota (315,72).

Ambos os descarregadores são constituídos por dois vãos independentes com uma estrutura de entrada equipada com uma soleira Bradley com crista à cota (304,50),

dimensionada para uma carga hidráulica de 9,9 m, e controlada por uma comporta de segmento de 6,0 m de largura e 11,5 m altura. Após a estrutura de entrada os descarregadores desenvolvem-se ao longo de um canal escavado na rocha revestido a betão liso terminando numa estrutura terminal em salto de esqui.



**Figura 1.** Vista geral da barragem de Alto Tâmega, planta

O descarregador direito apresenta um desenvolvimento máximo de 127,8 m no vão esquerdo e de 124,0 m no vão direito. Após a soleira o descarregador desenvolve-se em dois vãos de seção retangular com 6,0 m de largura com um declive a jusante da soleira de 50% seguido de uma concordância parabólica sendo o declive após a mesma de 10,21%. Após a zona do encontro da barragem uma nova concordância parabólica altera o declive para 62,66% até à estrutura de saída do descarregador. Ao longo deste troço a seção de cada vão sofre uma redução na sua largura inicial de 6,0 m para 4,5 m a montante do trampolim de saída em salto de esqui. A estrutura de saída, apresenta uma curva em planta e uma redução da secção de 4,5 m para 2,6 m na zona final. As cotas de lançamento dos jactos são (255,91) e (246,18) para os jactos do vão direito e esquerdo respetivamente, o ângulo de saída é de 25° no vão direito e horizontal no vão esquerdo, [\(IBERDROLA, 2014\)](#).

Por seu lado, o descarregador esquerdo apresenta um desenvolvimento inferior ao descarregador direito, 101,8 m no vão esquerdo e 110,7 m no vão direito. No entanto, o perfil dos dois descarregadores é idêntico tendo o descarregador esquerdo as mesmas características que o descarregador direito em termos de declives. A estrutura de saída em salto de esqui é caracterizada por uma redução de largura da secção de cada vão de 4,5 m a montante do salto de esqui para 2,2 m na zona terminal. As cotas de lançamento dos jactos são de (262,45) no vão direito e de (267,95) no vão esquerdo. Os ângulos de lançamento são de 15° e 25° para cada um dos vãos direito e esquerdo, [\(IBERDROLA, 2014\)](#).



### 3. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO

Para a realização do estudo em modelo reduzido foi construído no LNEC um modelo físico não distorcido à escala 1/46,875. O modelo incluiu uma parte significativa da albufeira, o corpo de barragem, os dois descarregadores, a central de pé de barragem e um trecho de rio a jusante suficientemente longo para reproduzir as condições de escoamento. De modo a estudar a erosão causada pelos jactos lançados pelos descarregadores o modelo contempla um troço do rio representado com fundo móvel.

Na Figura 2a é apresentada uma vista de montante do modelo, onde é possível ver o corpo da barragem, a estrutura de entrada do descarregador de cheias da margem esquerda e parte do trecho de rio a jusante da barragem. Uma vista de jusante é apresentada na Figura 2b, onde é visível a zona de fundo móvel utilizada para o estudo comparativo das erosões. Nas Figuras 2c e 2d são apresentadas duas vistas de jusante dos descarregadores de cheias, direito e esquerdo respetivamente.



**Figura 2.** Modelo físico: a) vista de montante; b) vista de jusante; c) descarregador direito, vista de jusante; d) descarregador esquerdo, vista de jusante

Os descarregadores de cheias foram moldados em argamassa de cimento e areia, sendo que as superfícies de contacto com o escoamento apresentam um revestimento em argamassa de cimento, que simula a rugosidade das superfícies de betão do protótipo. As formas alternativas das estruturas de saída foram reproduzidas utilizando diversas técnicas. Numa primeira fase, foi utilizada argamassa de cimento e madeira, no caso do descarregador da margem esquerda, e, em fase posterior, uma combinação de peças moldadas em argamassa de cimento com peças produzidas através de impressão 3D utilizando a técnica de deposição de filamento de um termoplástico do tipo ABS, no caso do descarregador de cheias direito.

A alimentação do modelo é realizada através do sistema de bombagem do pavilhão de ensaios sendo que à entrada do modelo o escoamento atravessa um sistema de tranquilização. Os caudais são medidos através de caudalímetros eletromagnéticos com um erro inferior a 1%. O nível de água no interior da albufeira e no troço de rio a jusante da barragem é medido através de hidrómetros de ponta direita com um erro inferior a  $\pm 0,2$  mm. Os níveis de água a jusante da barragem são também medidos utilizando sondas ultrasónicas, com um erro inferior a  $\pm 0,3$  mm.

O levantamento das cavidades de erosão foi realizado através de dois métodos: método tradicional, que consiste na identificação das curvas de nível com recurso a hidrómetros, e através de um método de fotogrametria. O método de fotogrametria cria uma superfície tridimensional da zona de estudo com base em fotografias obtidas a partir de diversos ângulos. Ambos os métodos apresentaram resultados idênticos na caracterização geral da fossa de erosão. No entanto, considerou-se que o método de fotogrametria possui várias vantagens, nomeadamente a maior facilidade e rapidez de aplicação e a caracterização mais detalhada da fossa de erosão, cumprindo as exigências de precisão requeridas no estudo.

Durante os ensaios realizados no modelo físico foram reproduzidos diversos caudais sendo o máximo de  $1\,934\text{ m}^3/\text{s}$  no protótipo que corresponde a aproximadamente  $128\text{ l/s}$  no modelo físico.

## **4. RESULTADOS DO FUNCIONAMENTO DA ESTRUTURA TERMINAL EM SALTO DE ESQUI**

### **4.1 FORMAS DE PROJETO. RESULTADOS EM MODELO REDUZIDO**

Numa primeira fase do estudo em modelo foram analisadas as formas de projeto das estruturas de saída dos dois descarregadores. Na Figura 3 são apresentadas duas vistas dos jactos para ensaios com o caudal de projeto considerando apenas um dos descarregadores em funcionamento ( $913\text{ m}^3/\text{s}$ ). Na Figura 3a é possível ver que os jactos formados pelo descarregador direito apresentam uma boa dispersão em altura, no entanto, a zona de impacto do jacto é próxima da margem esquerda. Na Figura 3b, é possível observar que os jactos do descarregador esquerdo praticamente não sofrem dissipação de energia ao longo da sua trajetória no ar, sendo a zona de impacto na margem direita, junto à base da encosta que sustenta o descarregador direito. Como consequência, as cavidades

de erosão provocadas por estes jactos poderiam colocar em causa a estabilidade das margens, incluindo a zona onde está implantado o descarregador direito.



**Figura 3.** Formas de projeto. Ensaio com o caudal de projeto,  $913 \text{ m}^3/\text{s}$ , no descarregador direito, a), e esquerdo, b).

Dadas as características dos jactos formados pelos dois descarregadores iniciaram-se os estudos em modelo físico e numérico das formas alternativas das estruturas de saída dos descarregadores.

#### **4.2 FORMAS FINAIS. RESULTADOS EM MODELO REDUZIDO E EM MODELO NUMÉRICO**

Face às conclusões anteriores, foram estudadas em modelo físico e em modelo numérico formas alternativas das estruturas de saída dos descarregadores com o objetivo principal de maximizar a dispersão dos jactos e minimizar as erosões do leito. Neste âmbito foram estudadas duas soluções alternativas da estrutura de saída de cada um dos descarregadores. No descarregador da margem direita as alterações consistiram no aumento da extensão de cada um dos vãos do descarregador, numa pequena alteração na curvatura do descarregador em planta, na alteração das cotas de lançamento dos jactos e do ângulo de saída dos mesmos. Por outro lado, no descarregador da margem esquerda foi alterado o alinhamento da estrutura terminal em planta passando esta a apresentar uma curva. Adicionalmente a esta alteração, a largura de cada vão deixou de ser constante, verificando-se a sua redução ao longo da estrutura terminal até atingir 2,2 m, e as cotas de lançamento dos jactos dos dois vãos foram alteradas para valores superiores, assim como o ângulo de lançamento dos mesmos.

Na Figura 4a é apresentada uma vista dos jactos formados pelo descarregador da margem direita com a estrutura de saída na sua forma proposta para o caudal de projeto,  $913 \text{ m}^3/\text{s}$ . Através de comparação com a Figura 3a é possível verificar que existe uma maior dispersão vertical dos jactos, uma separação dos dois jactos ao longo da sua trajetória e um ponto de impacto próximo do talvegue do rio. Da mesma forma, na Figura 4b é apresentada uma vista dos jactos formados pelo descarregador esquerdo para o caudal de projeto,  $913 \text{ m}^3/\text{s}$ . Analogamente, fazendo uma comparação com a Figura 3b é possível concluir que os jactos agora formados apresentam uma maior dispersão vertical ao longo da sua trajetória, um



alcance superior e um ponto de impacto próximo do talvegue do rio, mimizando deste modo a incidência e projeção dos jactos nas encostas.



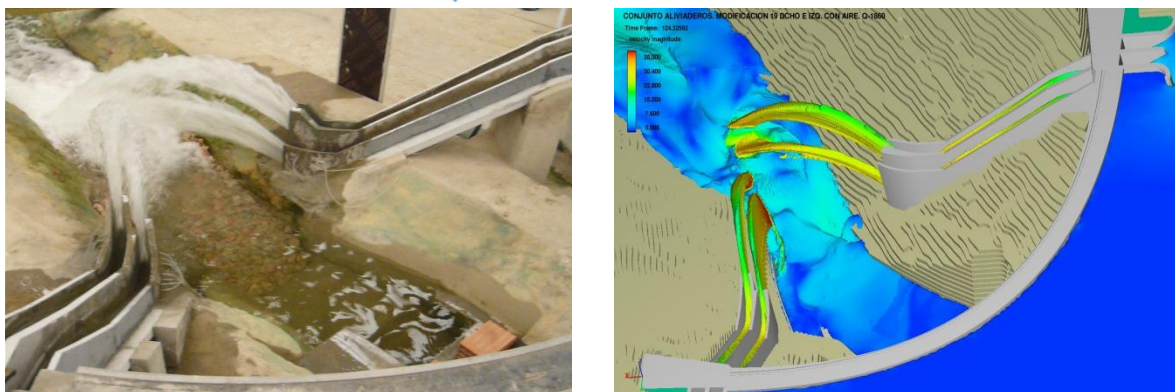
**Figura 4.** Formas propostas. Ensaio com o caudal de projeto,  $913 \text{ m}^3/\text{s}$ , no descarregador direito, a), e esquerdo, b).

Os ensaios em modelo físico das alterações das formas de lançamento dos descarregadores foram efetuados em simultâneo com estudos com o modelo numérico *Flow 3D*, *CFD Software*, versão 11.1.0.23. Os estudos em modelo numérico foram realizados em três fases. Em primeiro lugar foram realizadas simulações numéricas utilizando uma malha tridimensional regular com 2,00 m, passando depois para uma malha de 0,50 m num segundo cálculo e, finalmente, para uma malha fina de 0,25 m. Desta forma, algumas das propostas de alterações foram descartadas com as primeiras malhas, economizando muito tempo na avaliação de cada uma das propostas.

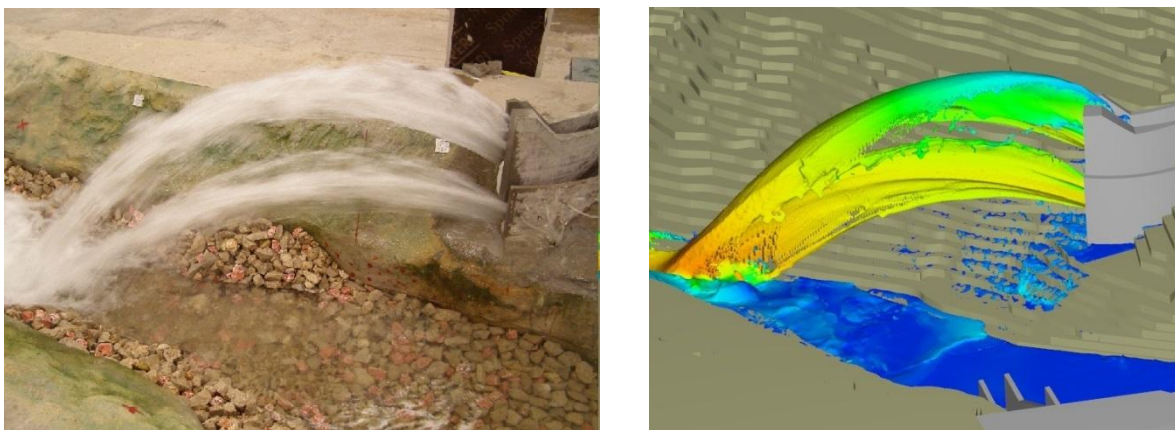
A finalidade do modelo numérico foi a de permitir a comparação das várias alternativas, realizando o menor número de alterações no modelo físico e reduzindo o tempo necessário para a modelação de peças, cuja geometria é complexa. A comparação dos resultados dos modelos numérico e físico permitiu a calibração de alguns parâmetros no modelo numérico, como por exemplo, o emulsãoamento de ar no jacto.

Uma vez calibrado o modelo numérico, analisou-se o funcionamento das formas de projeto, tendo sido introduzidas alterações no lançamento dos descarregadores, designadamente na largura, ângulo e no raio de lançamento em cada vão, procurando corrigir aspetos detetados no modelo físico para a solução de projeto.

Uma vez alcançada no modelo numérico a solução adequada para o lançamento dos jactos, foram reproduzidas as peças através de impressão 3D que foram ensaiadas no modelo físico. Os resultados obtidos por ambos os modelos foram semelhantes, como se pode observar nas Figuras 5 e 6.



**Figura 5.** Formas propostas. Ensaio físico e numérico com o funcionamento dos dois descarregadores com caudal de projeto,  $1826 \text{ m}^3/\text{s}$



**Figura 6.** Formas propostas. Ensaio físico e numérico com o caudal de projeto,  $913 \text{ m}^3/\text{s}$ , no descarregador direito

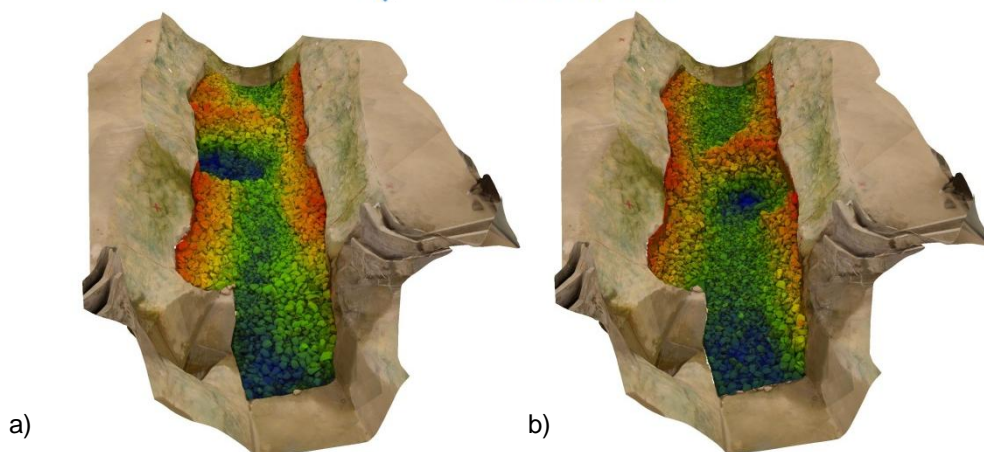
Face às características do escoamento obtidas para estas formas alternativas considerou-se que seriam estas as formas propostas para os descarregadores de cheias.

A partir de técnicas de fotogrametria que permitem determinar as coordenadas de pontos a partir de fotografias tiradas de diferentes ângulos, obtiveram-se os levantamentos topográficos do leito no final de cada ensaio de erosão. Deste modo, foi possível realizar medições de cotas no leito alterado após os ensaios, assim como fazer uma comparação entre o leito inalterado e o leito alterado pela ação dos jactos.

Alteradas as formas das estruturas de saída dos dois descarregadores foram realizados ensaios de erosão, considerando o funcionamento de cada um dos descarregadores durante o equivalente a 18 horas no protótipo, com o caudal de projeto,  $913 \text{ m}^3/\text{s}$ , e o nível a jusante do ponto de impacto dos jactos definido pela curva de vazão para a situação da construção da barragem de Daivões e um coeficiente de Manning-Strickler igual a  $25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ .

Na Figura 7 são apresentados os modelos tridimensionais obtidos no final dos ensaios para o descarregador direito, Figura 7a, com o caudal de projeto,  $913 \text{ m}^3/\text{s}$  e Figura 7b para o descarregador esquerdo com as formas propostas.





**Figura 7.** Modelos tridimensionais do leito após o ensaio com as formas propostas e com caudal de projeto do descarregador direito (a) e do descarregador esquerdo (b)

Analisando os dados dos levantamentos fotogramétricos é possível verificar que as duas cavidades de erosão apresentam valores próximos. Por outro lado, a cota obtida para o ponto mais alto da barra formada a jusante da cavidade de erosão, é superior no caso do descarregador esquerdo face ao ensaio do descarregador direito. Através dos resultados obtidos constata-se que as cotas mais baixas nas cavidades de erosão são próximas da cota do talvegue na zona a montante da saída do desvio provisório. Por outro lado, as barras formadas não ocupam toda a largura do rio, tendo-se constatado que não terão um impacto muito significativo no funcionamento da central.

Através dos levantamentos do fundo realizados com a técnica de fotogrametria foi possível concluir que as formas de propostas minimizam as erosões causadas pelos jactos no leito e deste modo, no protótipo as erosões causadas serão inferiores às que seriam provocadas pelas formas de projeto. Adicionalmente a técnica utilizada provou ter capacidade para, de uma forma relativamente simples, criar modelos tridimensionais da zona de estudo e assim conseguir extrair com a exatidão necessária os dados mais relevantes para o estudo em questão.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo hidráulico dos descarregadores de cheias da barragem de Alto Tâmega contemplou estudos em modelo físico reduzido, construído no LNEC, e em modelo numérico. No estudo em modelo físico foi analisado o funcionamento das formas de projeto, tendo-se concluído pela necessidade de alterar as formas das estruturas de saída em salto de esqui dos descarregadores de cheias, de forma a minimizar as cavidades de erosão provocadas pelo impacto dos jactos no leito.

O estudo das formas alternativas das estruturas de saída foi realizado simultaneamente em modelo físico e em modelo numérico. Deste modo, foi possível estudar em modelo numérico diversas formas alternativas, tendo sido materializadas no modelo físico as soluções que para cada descarregador obtiveram os melhores resultados no modelo numérico. Comparando visualmente o escoamento obtido através dos dois modelos, físico e numérico,



7, 8 e 9  
Março 2018  
ÉVORA  
Évora Hotel

GESTÃO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS:  
**NOVOS  
DESAFIOS**

é possível concluir que o modelo numérico representa o escoamento observado no modelo físico. A utilização deste tipo de abordagem permitiu encurtar a duração dos ensaios em modelo físico, uma vez que, apenas foram estudadas duas formas alternativas para cada estrutura da saída de cada um dos descarregadores.

Através da utilização da técnica de fotogrametria foi possível caracterizar o leito do rio após os ensaios de erosão. Verificou-se através dos modelos tridimensionais obtidos que as cavidades de erosão causadas pelas formas propostas das estruturas de saída minimizam a erosão causada pelos jactos quando comparadas com as cavidades verificadas para as formas de projeto.

No estudo dos descarregadores de cheias da barragem de Alto Tâmega ficou demonstrado que os modelos numéricos podem complementar os modelos físicos e com isso obter resultados otimizados no modelo físico de forma mais célere. Adicionalmente, a materialização de parte da estrutura de saída do descarregador direito através de impressão 3D e a utilização da técnica de fotogrametria foram inovações incluídas neste estudo, respondendo às necessidades de aquisição rápida de informação topográfica e de redução da duração do estudo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

IBERDROLA (2014). Projecto do Aproveitamento Hidroeléctrico de Alto Tâmega. Volume 1, Anexo 9 - Cálculos Hidráulicos.