



## MODELAÇÃO FÍSICA E NUMÉRICA DO ESCOAMENTO NO DESCARREGADOR COMPLEMENTAR DA BARRAGEM DE CANIÇADA

Luís, BRANDÃO<sup>1</sup>; António, MURALHA<sup>2</sup>; Lúcia, COUTO<sup>3</sup>; Rodrigo, MAIA<sup>4</sup>

1 - Eng.º Civil, Mestre, luis.brandao@fe.up.pt, 969 978 259

2 – Eng.º Civil, Mestre, Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066  
Lisboa, amuralha@lnec.pt, 218 443 620

3 - Eng.ª Civil, Doutora, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066  
Lisboa, lcouto@lnec.pt, 218 443 616

4 – Eng.º Civil, Doutor, Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias,  
4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt, 225 081 916

### Resumo

Os modelos numéricos têm vindo a adquirir um peso cada vez maior na resolução de problemas complexos no âmbito da engenharia hidráulica. No entanto, esses modelos não são ainda uma ferramenta totalmente consolidada em casos de estruturas hidráulicas e de escoamentos com elevada complexidade.

Nesta comunicação é apresentado um estudo do escoamento ao longo do novo descarregador de cheias complementar, em construção na Barragem de Caniçada, em que foram utilizadas medições realizadas em modelo físico para a calibração e validação de um modelo numérico CFD.

Neste sentido, após uma breve apresentação da barragem de Caniçada e a caracterização do descarregador de cheias, da campanha experimental levada a cabo no modelo físico e do modelo numérico utilizado, são discutidos e comparados os resultados obtidos por ambos os modelos.

A barragem de Caniçada foi construída em 1955 e está localizada na região Noroeste de Portugal. O sistema de órgãos hidráulicos de descarga de cheias foi objeto de estudo em modelo físico reduzido não distorcido à escala 1/62 no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Esse estudo em modelo reduzido teve como objetivo a avaliação das condições do escoamento nos descarregadores em funcionamento conjunto ou isolado e a validação das formas de projeto do novo descarregador em túnel. Foram realizadas medições neste modelo com a finalidade de validar simulações numéricas.

A simulação numérica do escoamento ao longo do descarregador foi realizada com recurso ao *software* comercial FLOW 3D. A comparação de resultados dos modelos físico e numérico, designadamente na vazão, alturas do escoamento, pressões médias e valores de alcance do jacto, demonstrou relações aceitáveis.

Em conclusão, considera-se que o *software* comercial utilizado pode ser pertinente para a previsão do funcionamento de um descarregador de cheias deste tipo em fases iniciais de projeto.

**Palavras-chave:** Modelo físico, modelo numérico, descarregador de cheias, estruturas hidráulicas, aproveitamentos hidráulicos, barragem.

**Tema:** Dimensionamento e operação de aproveitamentos hidráulicos.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento e objetivo

O estudo de estruturas hidráulicas ao longo dos anos, em diversos países e também em Portugal, recorreu de forma significativa a modelos físicos reduzidos de modo a avaliar e validar as características do escoamento previstas na fase de projeto. Contudo, ao longo dos últimos 30 anos, as técnicas de modelação numérica têm vindo a ser desenvolvidas a um ritmo elevado devido ao aumento da potência computacional. Assim sendo, a utilização de modelos numéricos no domínio da dinâmica dos fluidos tem vindo progressivamente a ganhar um papel mais relevante no apoio ao projeto de estruturas hidráulicas. No entanto, dado que os resultados da modelação numérica não oferecem total confiança, estes devem ser validados com dados provenientes de modelos físicos ou mesmo com medições em protótipo.

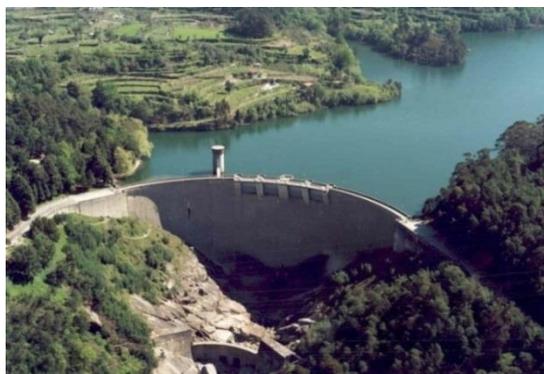
O escoamento no descarregador de cheias complementar da barragem de Caniçada foi objeto de estudo por parte destes dois tipos de modelos, físico e numérico. Os resultados de uma campanha de medições realizada no modelo físico reduzido, construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), foram comparados com os resultados obtidos através de simulações numéricas utilizando o *software* comercial FLOW 3D.

A comunicação apresenta uma avaliação da capacidade de um modelo numérico produzir resultados adequados das características do escoamento ao longo do descarregador de cheias da barragem de Caniçada similares aos que foram obtidos em modelo reduzido.

### 1.2 A barragem de Caniçada

Construída em 1955, a barragem de Caniçada localiza-se na região Noroeste de Portugal, aproximadamente 17 km a jusante da barragem de Salamonde e a cerca de 30 km da cidade de Braga, fazendo parte do Sistema Hidroelétrico Cávado-Rabagão-Homem explorado pela EDP Produção. O escalão de Caniçada é constituído pela barragem e respetivos órgãos de segurança, circuito hidráulico em túnel, central e subestação.

A barragem de Caniçada é de betão do tipo abóbada de dupla curvatura, com 76 m de altura máxima e apresenta um coroamento que se desenvolve na extensão de 196 m, à cota (153,50), Figura 1. A albufeira criada pela barragem tem uma capacidade total de cerca de 153 hm<sup>3</sup> quando o nível de água se situa na cota (152,50), nível de pleno armazenamento (NPA).



**Figura 1.** Barragem de Caniçada

O descarregador de cheias que foi originalmente construído, e que se encontra localizado na parte central do corpo da barragem próximo do coroamento (ver Figura 1), é constituído por quatro vãos retangulares controlados por comportas *Stoney*. Apresenta uma capacidade máxima de vazão de aproximadamente 1 700 m<sup>3</sup>/s para o nível de máxima cheia (NMC), definido no projeto inicial à cota (153,00). A restituição do caudal descarregado é efetuada através de jactos livres, e a dissipação de energia processa-se por impacto dos jactos no leito rochoso do rio ou colchão de água existente a montante da barragem, criado por um açude implementado aproximadamente 100 m a jusante do corpo da barragem.

Dada a evolução dos regulamentos de segurança para a exploração de barragens em Portugal, foram realizados pela EDP Produção estudos no âmbito do controlo da segurança hidráulico-operacional da barragem de Caniçada, (Oliveira et al., 2012). Os referidos estudos levaram à definição de um novo caudal de projeto para a barragem de Caniçada e à consequente análise da adequação dos órgãos de descarga existentes, designadamente descarregador e descarga de fundo. Oliveira et al. (2012) concluíram que, dada a capacidade máxima do descarregador existente e o novo caudal de projeto, caso não fossem tomadas quaisquer medidas suplementares, a cota da superfície livre na albufeira seria superior à cota do coroamento da barragem. Após análises técnicas, económicas e ambientais foi decidido construir um novo descarregador de cheias, seguidamente designado por descarregador de cheias complementar, (Oliveira e Dias da Silva, 2012).

### 1.3 Descarregador de cheias complementar

Tomada a decisão de construção de um novo descarregador de cheias complementar, foram estudadas várias soluções, tendo sido adotada a solução de um túnel escavado na margem esquerda com uma capacidade máxima de vazão de 2 062 m<sup>3</sup>/s, sob o novo valor do NMC, fixado à cota (152,83), Figura 2.



**Figura 2.** Descarregador de cheias complementar, implantação (Couto et al., 2014)

O descarregador de cheias complementar é constituído por: uma estrutura de entrada, um túnel de geometria variável e uma estrutura terminal em trampolim.

A montante da estrutura de entrada foi escavada uma plataforma horizontal de aproximação do escoamento de modo a criar condições de alimentação ao descarregador. A estrutura de entrada, do tipo frontal, é constituída por uma soleira WES, equipada com duas comportas de superfície. Um pilar com forma aerodinâmica em planta faz a separação da estrutura de entrada em dois vãos iguais com 8,75 m de largura. A soleira é caracterizada por um

paramento de montante inclinado, com declive de 1:1,5 (H:V), crista à cota (138,50) e uma carga hidráulica de dimensionamento de 12,50 m.

Seguidamente à estrutura de entrada, um túnel revestido a betão com secção transversal variável e uma extensão de aproximadamente 200 m faz a ligação da estrutura de entrada à estrutura de saída. A secção transversal do túnel é dividida por um septo central, dando continuidade ao pilar que faz a separação em dois vãos da soleira descarregadora na estrutura de entrada.

A estrutura terminal do descarregador de cheias complementar, a céu aberto, é constituída por um troço em canal com cerca de 60 m de extensão que finda numa estrutura em trampolim também ela dividida pelo septo central.

## 2. ESTUDO HIDRAULICO EM MODELO REDUZIDO

### 2.1 Descrição do modelo

Foi construído no LNEC um modelo físico não distorcido com uma escala geométrica de 1/62 com o objetivo de avaliar o funcionamento em termos de condições do escoamento ao longo do descarregador e, em consequência, apoiar e permitir ajustar o projeto do novo descarregador de cheias complementar da barragem de Caniçada. O estudo em modelo hidráulico, solicitado pela EDP Produção, foi apresentado em Couto et al. (2014) e Couto et al. (2015). Foi realizada uma campanha de medições (Muralha et al. 2014) com o propósito específico de proceder à observação de parâmetros do escoamento que permitissem a calibração e validação dos resultados do modelo numérico.

A Figura 3 permite ter uma noção do modelo reduzido construído: na fotografia do lado esquerdo é apresentada uma vista geral (por jusante) do modelo e na fotografia do lado direito é apresentado um pormenor da estrutura de entrada do descarregador de cheias complementar. O modelo físico apresenta dimensões consideráveis, sendo as mais relevantes: 2,3 m de altura, comprimento de 13,3 m e largura máxima de 6,7 m.



**Figura 3.** Modelo físico reduzido

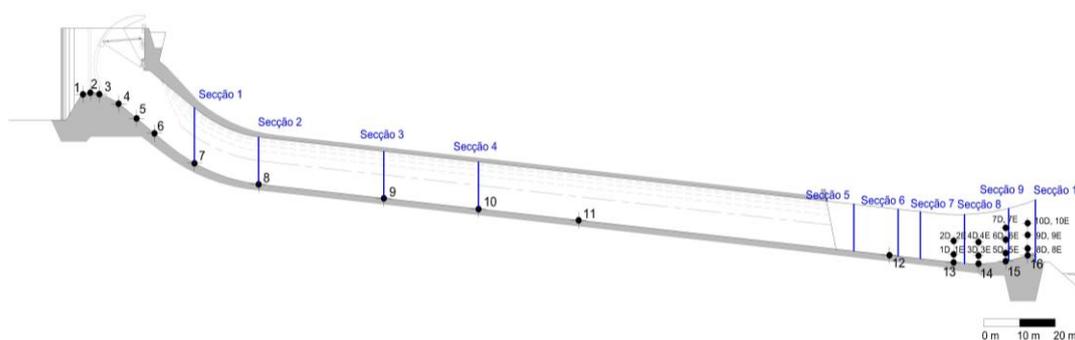
No modelo foram reproduzidas, para além das estruturas dos descarregadores de cheias, a barragem, uma extensão significativa da albufeira e a zona de jusante, que engloba o leito do rio numa extensão suficiente para garantir a reprodução das condições locais de receção e de restituição dos caudais descarregados.

Na referida zona de jusante do modelo, foi deixada uma caixa preenchida com brita, por forma a ser possível avaliar os efeitos de erosão expectáveis de ocorrer na zona de impacto dos jactos descarregados, quando tal ocorre.

## 2.2 Caracterização da campanha experimental de validação do modelo numérico

Foi conduzida uma campanha experimental (referida com detalhe em Muralha et al. 2014), especificamente destinada à obtenção de dados que permitissem (i) a calibração de um modelo numérico e (ii) a comparação desses dados com resultados obtidos através de um modelo numérico.

A referida campanha experimental incluiu medições, para diversos caudais de: alturas de escoamento, nas 10 secções representadas na Figura 4; pressões médias e, ainda medições do alcance do jacto.



**Figura 4.** Localização das tomadas de pressão e das secções de medição da altura de escoamento

Na Figura 4 é ainda apresentada a localização das tomadas de pressão ao longo do descarregador, nas quais foram feitas as leituras de alturas piezométricas. Foram obtidas pressões médias (i) para dezasseis pontos de medição no fundo do descarregador, no vão esquerdo e a meio da secção transversal, representados na Figura 4 pelos números 1 a 16, e (ii) para vinte pontos de medição, nos muros direito e esquerdo da estrutura de saída, sendo dez no muro direito (tomadas de pressão 1D a 10D) e os restantes no muro esquerdo (tomadas de pressão 1E A 10E).

Foi realizado um ensaio com o caudal de projeto ( $2\,062\text{ m}^3/\text{s}$ ), o qual exigiu a manutenção da cobertura do túnel (Figura 3), que não permitiu obter as medições de altura do escoamento. Nesse ensaio foram registadas as alturas piezométricas e foi determinado o alcance do jacto.

As medições de alturas de escoamento implicaram a remoção da parte superior do túnel do descarregador, materializada em acrílico no modelo (Figura 3). O facto de se terem realizado ensaios sem esta cobertura levou a que os caudais da campanha experimental fossem condicionados para evitar o galgamento dos muros laterais do descarregador. Assim sendo, e para além do ensaio do caudal de projeto, foram realizados mais quatro ensaios para caudais de  $303\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $527\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $690\text{ m}^3/\text{s}$  e  $896\text{ m}^3/\text{s}$ , nos quais foram medidas alturas de escoamento, pressões médias e o alcance do jacto.

Durante a realização dos ensaios, o nível de água na albufeira foi sempre mantido no NPA, o que levou a que, para o caudal de projeto, as comportas estivessem totalmente abertas. Para os restantes quatro caudais ensaiados, as comportas encontravam-se parcialmente

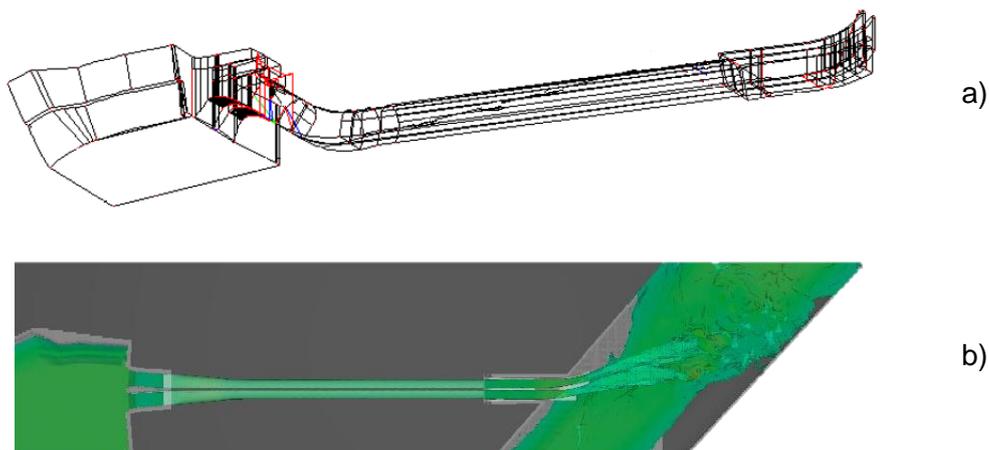
abertas, o que provocou que o escoamento na estrutura de entrada ocorresse através de orifício sob as comportas.

## 3. MODELO NUMÉRICO

### 3.1 Caracterização do modelo numérico

No presente estudo foi utilizado o modelo numérico CFD (*Computational Fluid Dynamics*) FLOW 3D para simular o escoamento ao longo do descarregador de cheias complementar. O modelo CFD permite modelar escoamentos multifásicos através do Método de Volumes Finitos (VOF), pela resolução das equações de movimento de *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS), com base num sistema de representação geométrica cartesiano. Cada célula da malha de cálculo utilizada é caracterizada por valores médios dos parâmetros de escoamento, pressão e velocidade, em intervalos de tempo discretos.

A representação da geometria do descarregador e do terreno envolvente foi produzida com recurso ao AutoCad 3D. A simulação foi efetuada em modelo numérico à escala real e dividida em duas fases, tendo como objetivo a redução do tempo de cálculo de cada fase. Numa primeira fase, para simulação do escoamento entre a estrutura de entrada e a secção terminal do descarregador, foi definido um domínio correspondente, de aproximadamente 20 % do domínio representado em modelo físico, com dimensões de 350 x 119 x 83 m (x,y,z), (Figura 5a). As correspondentes simulações tiveram como objetivo determinar valores de pressão, velocidade, alturas de escoamento e caudais descarregados no modelo computacional, no trecho do descarregador em túnel e no canal a céu aberto, não tendo sido simulado, nessa primeira fase, o escoamento no jacto após a saída do trampolim. Para tal, foi considerado um tempo de simulação correspondente a uma descarga de caudal com duração de 100 s. A segunda fase das simulações teve como objetivo estimar o alcance do jacto, para o que foi utilizada uma malha mais grosseira e um domínio de escoamento com maiores dimensões, 520 x 119 x 83 m (x,y,z), (Figura 5b), correspondente a cerca de 30% do domínio representado no modelo físico. A dimensão utilizada permitiu a inclusão do trecho de rio a jusante do descarregador de cheias, isto é, a zona de impacto do jacto passou a ficar inserida no domínio. O tempo de simulação considerado foi o equivalente à descarga do caudal durante 50 s.



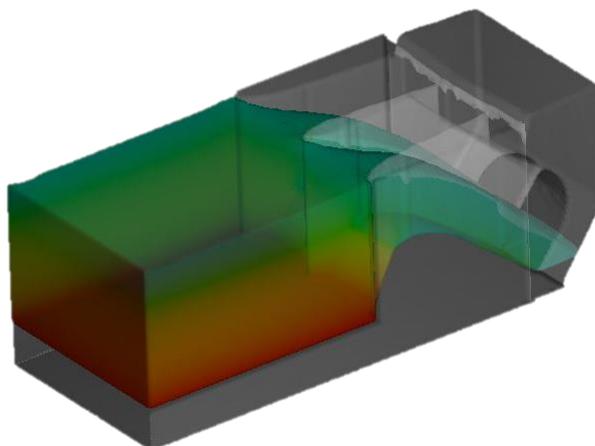
**Figura 5.** Domínio de simulação. a) nas simulações da primeira fase, b) nas simulações da segunda fase

Como condições de fronteira para a primeira fase de simulações, ou seja, o escoamento ao longo do descarregador, e para cada um dos caudais considerados, foram adotadas a cota do NPA e a pressão na zona de albufeira (zona de entrada do escoamento em modelo numérico). Nas simulações com o objetivo de determinar o alcance do jacto, foram adoptados, como condições de fronteira: (i) a montante, os valores característicos do escoamento (altura de escoamento, pressão e velocidade) para o último instante considerado na simulação anterior (primeira fase) e (ii); a jusante, as cotas da superfície livre no rio Cávado.

### 3.2 Testes de sensibilidade

A análise de sensibilidade aos diferentes parâmetros do modelo numérico é uma etapa preponderante numa simulação numérica. Neste trabalho, foram conduzidos diferentes testes de sensibilidade, aplicados à zona de entrada do descarregador, em domínios com duas e três dimensões, Figura 6. Nesses testes de sensibilidade foi analisada a influência dos seguintes parâmetros no tempo de cálculo e na precisão dos resultados:

- Utilização de equações de 1ª e 2ª ordem;
- Refinamento da malha de cálculo;
- Consideração de emulsão de ar.



**Figura 6.** Escoamento ao longo da zona de entrada do descarregador nos testes de sensibilidade

Da análise efetuada concluiu-se que é favorável o cálculo da quantidade de movimento através de equações de 2ª ordem, em detrimento do cálculo por equações de 1ª ordem, bem como a consideração do efeito que o emulsão de ar tem no escoamento, garantindo-se assim uma maior precisão nos resultados sem que a duração do processo de cálculo aumente de forma significativa.

Partindo da análise de sensibilidade, foi possível estabelecer as condições gerais a considerar no modelo numérico para posterior simulação dos diferentes caudais, assegurando um correto compromisso entre o tempo de cálculo e a precisão dos resultados.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caudais descarregados

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos caudais escoados nos ensaios em modelo físico e os correspondentes valores de caudal obtidos nas simulações com o modelo numérico.

**Tabela 1.** Caudais descarregados no modelo físico e obtidos no modelo numérico

Caudal descarregado (m <sup>3</sup> /s)		Diferença (%)
Modelo físico	Modelo numérico	
2062	2052,2	0,48
896	845,4	5,65
690	727,3	5,01
527	551,7	4,68
303	291,8	3,69

Conclui-se que a diferença entre os valores de caudal com que foram realizados os ensaios no modelo físico e os correspondentes valores obtidos no modelo numérico é muito reduzida. Nas condições do ensaio com o caudal de projeto, não existe, em termos práticos, diferença para o valor obtido no modelo numérico. Nas restantes simulações com o modelo numérico, as diferenças entre os caudais obtidos e os correspondentes valores com que foram realizados os ensaios no modelo físico encontram-se na ordem dos 5%. Estas diferenças percentuais entre caudais são idênticas às que foram obtidas, em estudo semelhante realizado tendo como caso de aplicação o descarregador de cheias complementar da barragem de Salomonde, por Silva et al. (2014). Assim, pode-se assumir que o modelo numérico dificilmente permitirá obter um valor de caudal exatamente igual ao que é reproduzido em modelo físico. No entanto, dadas as incertezas de cálculo e os possíveis erros de medição, as diferenças encontradas, inferiores a 5%, são consideradas como um bom resultado para um estudo deste tipo.

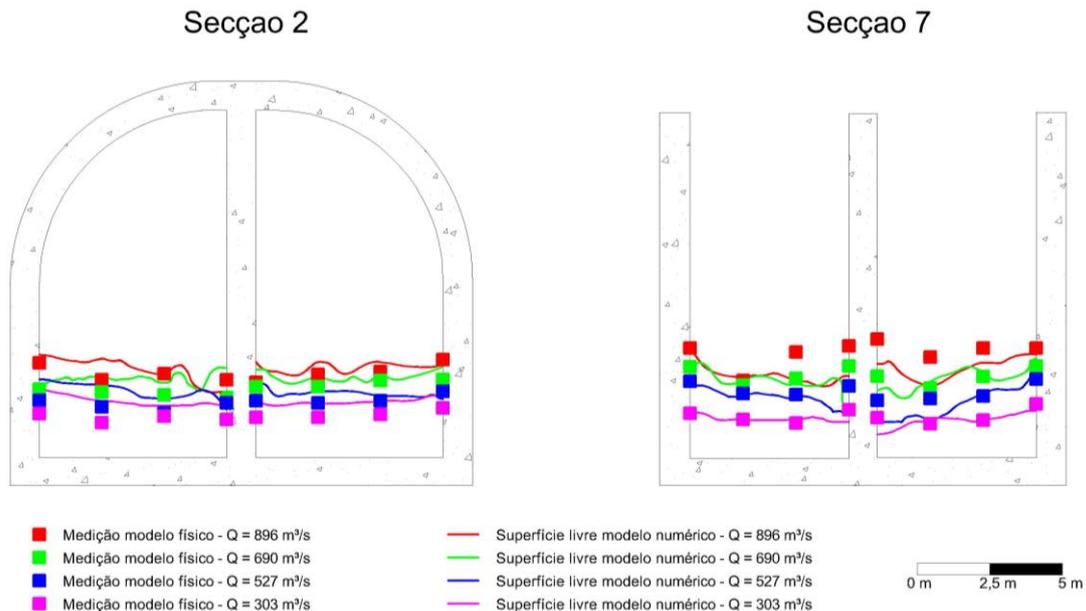
### 4.2 Alturas de escoamento

A comparação das alturas de escoamento em diferentes secções para os diferentes caudais dos ensaios foi considerada como o principal objetivo para a aferição da capacidade do modelo numérico simular o escoamento ao longo do descarregador.

Foram analisados os valores de alturas de escoamento para os caudais de 896 m<sup>3</sup>/s, 690 m<sup>3</sup>/s, 527 m<sup>3</sup>/s e 303 m<sup>3</sup>/s nas dez secções transversais ao longo do descarregador já identificadas, Figura 4.

A concordância entre os valores de altura de escoamento nos dois modelos é bastante razoável, sendo que as diferenças mais significativas ocorrem nas secções 9 e 10, localizadas na parte final do descarregador.

Na Figura 7 são apresentadas as alturas de escoamento para duas secções – secção 2 na imagem da esquerda e secção 7 na imagem da direita - para os diferentes caudais em estudo. A configuração da superfície livre obtida no modelo físico é muito próxima da que foi determinada pelo modelo numérico para a secção 2 para os ensaios com os caudais mais elevados (896 m<sup>3</sup>/s e 690 m<sup>3</sup>/s). Na secção 7 existe maior concordância entre os valores de alturas de escoamento para totalidade dos caudais. No entanto, nesta secção, o modelo numérico apresenta valores com maiores diferenças em relação aos valores do modelo físico para o caudal mais elevado (896 m<sup>3</sup>/s), contrariamente ao que acontecia para a secção 2 onde os valores do modelo numérico se distanciavam dos valores medidos no modelo físico para o caudal inferior (303 m<sup>3</sup>/s).



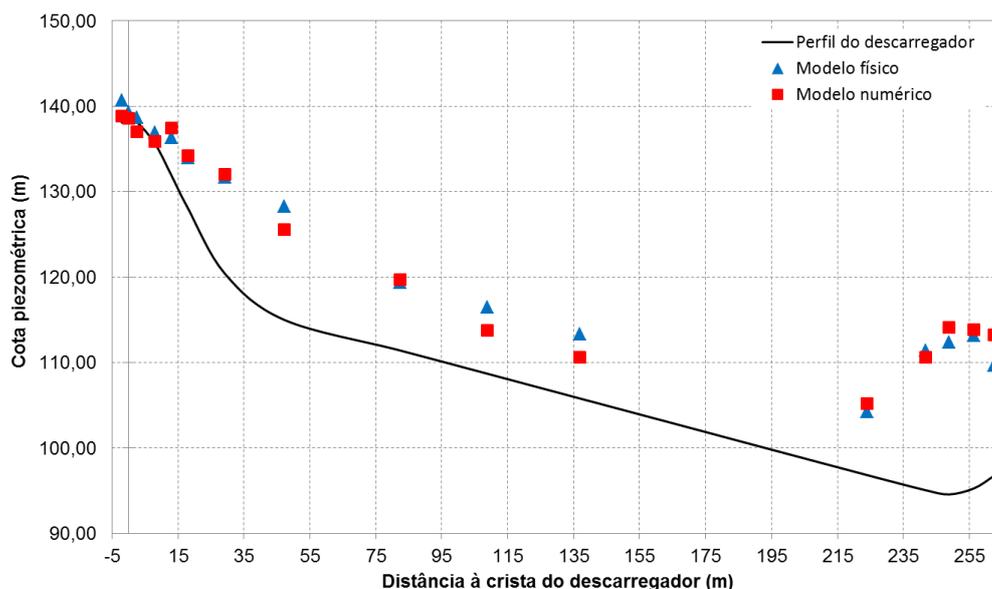
**Figura 7.** Configuração da superfície livre para o caudal de 896 m<sup>3</sup>/s. Secções 2 e 7

Com base na comparação dos valores das alturas de escoamento medidos no modelo físico e fornecidos pelo modelo numérico, é possível concluir que o modelo CFD tem capacidade para simular a configuração e evolução da superfície livre ao longo do descarregador.

### 4.3 Pressões

Foram avaliadas pressões no modelo físico através de leituras em piezómetros distribuídos ao longo do fundo do descarregador e nos muros laterais da estrutura de saída. A localização das tomadas de pressão foi apresentada na Figura 4.

Na Figura 8 são apresentados os valores das alturas piezométricas observados no modelo físico e os valores de pressão obtidos no modelo numérico, nas dezasseis tomadas de pressão distribuídas ao longo da soleira do vão esquerdo do descarregador, para o caudal de 2 062 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 8.** Alturas piezométricas observadas no modelo físico e obtidas no modelo numérico, para o caudal de projeto (2 062 m³/s)

Conclui-se que os valores medidos no modelo físico e obtidos através do modelo numérico são relativamente próximos. De salientar que a variação das alturas piezométricas obtida nos dois modelos entre pontos de medição é idêntica ao longo da extensão descarregador.

#### 4.4 Alcance do jacto

A previsão do alcance dos jactos formados no trampolim do descarregador assume uma especial importância na caracterização e eventual prevenção dos efeitos erosivos nas margens e leito do rio. Embora as medições no modelo físico tenham associada uma considerável incerteza, foram obtidas através de um procedimento atento e cuidado, face à importância dessa quantificação. Na Tabela 2 são apresentados os valores de alcance do jacto medidos no modelo físico para os diversos ensaios e obtidos no modelo numérico.

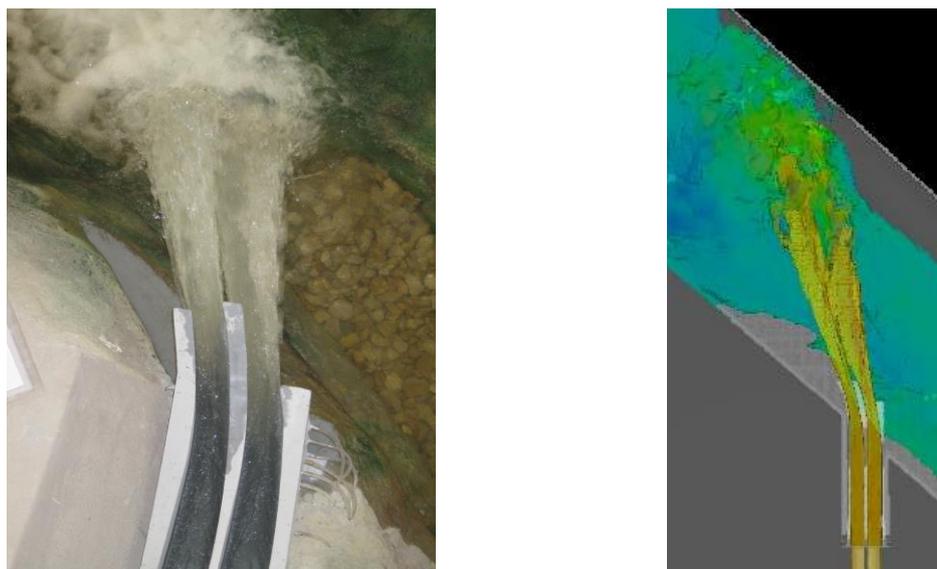
**Tabela 2.** Valores do alcance do jacto observados no modelo físico e obtidos no modelo numérico

Caudal (m³/s)	Alcance máximo do jacto (m)				Diferença (%)	
	Modelo físico		Modelo numérico		Vão esquerdo	Vão direito
	Vão esquerdo	Vão direito	Vão esquerdo	Vão direito		
2062	80,6	70,1	80,0	69,1	0,69	1,50
896	74,4	64,8	71,0	60,6	4,58	6,44
690	70,1	60,1	67,4	59,8	3,84	0,55
527	68,2	58,3	63,9	53,8	6,26	7,59
303	59,5	47,1	50,7	47,0	14,73	0,26

Comparando os resultados obtidos através do modelo numérico com as medições no modelo físico, considera-se que os resultados são muito próximos e com diferenças, na maioria das situações, inferiores a 8%. A maior diferença obtida (14.7%) corresponde ao

jacto do vão esquerdo com o caudal de  $303 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estes resultados foram também analisados face aos que foram obtidos no estudo de Silva et al. (2014), no qual foram identificadas diferenças entre o alcance máximo no modelo físico e no modelo numérico significativamente superiores. No entanto, naquele estudo não foi incluída a componente do emulsãoamento de ar na simulação numérica, o que se julga poderá justificar o melhor ajuste obtido no presente estudo.

A Figura 9 permite comparar o jacto observado no modelo físico (fotografia do lado esquerdo) e correspondente jacto obtido no modelo numérico (imagem do lado direito), para o caudal de projeto.



**Figura 9.** Jacto observado no modelo físico (à esquerda) e obtido no modelo numérico (à direita), para o caudal de projeto ( $2\,062 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Face aos resultados obtidos concluiu-se que o modelo numérico tem capacidade para simular adequadamente o alcance do jacto.

### 5. CONCLUSÕES

O funcionamento hidráulico do descarregador de cheias complementar da Barragem de Caniçada foi objeto de estudo em modelo numérico, com recurso ao *software* FLOW 3D, tendo sido realizada a comparação com medições realizadas em modelo físico. Sendo este descarregador uma estrutura de elevada complexidade, o exercício revestiu-se de um grau de análise consideravelmente difícil. O estudo apresentado demonstrou a capacidade do modelo numérico utilizado caracterizar o escoamento em diferentes pontos e secções do descarregador para as seguintes grandezas: pressão, alturas de escoamento e alcance do jacto.

Os testes de sensibilidade realizados com o modelo numérico permitiram a obtenção de um compromisso entre o tempo de cálculo e a precisão dos resultados, através da consideração das seguintes opções: resolução da quantidade de movimento por equações de 2ª ordem; não necessidade de refinamento excessivo da malha para valores inferiores a  $0,5 \text{ m}$ ; vantagem na consideração de emulsãoamento de ar.

## 13.º Congresso da Água

Da comparação estabelecida entre o modelo computacional final e o modelo físico há a destacar:

- A boa relação entre os caudais descarregados no modelo físico e computacional, com valores de desvio inferiores a aproximadamente 5% para todos os ensaios realizados no estudo;
- No que respeita às alturas de escoamento, os resultados revelam que o modelo computacional tem capacidade para simular o andamento da superfície livre ao longo do descarregador, tendo-se registado as maiores diferenças de resultados entre os dois modelos para as secções 9 e 10 onde o escoamento se dá com maiores velocidades e mais turbulência.
- Na obtenção de pressões verificou-se, de um modo geral, uma boa correspondência entre os valores obtidos em modelo físico pelas medições de alturas piezométricas e os resultados do modelo numérico.
- A simulação do alcance do jacto para os modelos físico e computacional apresentou uma boa correspondência, principalmente para os caudais mais elevados, registando-se em geral erros inferiores a 8%. O modelo numérico apresentou valores superiores para o alcance do jacto em relação às medições realizadas no modelo físico.

Em conclusão, os autores são de opinião que o *software* comercial utilizado (FLOW 3D) pode ser utilizado para a previsão do funcionamento de um descarregador de cheias deste tipo em fases iniciais de projeto e para determinação de diagramas de pressão a considerar no cálculo estrutural. Contudo, comprovou-se que os modelos físicos continuam a ser indispensáveis nomeadamente para caracterização de algumas condições de escoamento e para validar resultados computacionais. Neste sentido, julga-se que os modelos CFD podem ser úteis por permitirem, numa fase inicial de projeto, otimizar a geometria das estruturas através de séries de testes com maior flexibilidade do que o que é implicado no recurso a modelos reduzidos.

### AGRADECIMENTOS

É devido um agradecimento à EDP Produção, entidade que solicitou o estudo em modelo físico ao LNEC e que autorizou a publicação dos resultados no âmbito desta comunicação.

Os autores agradecem ainda o financiamento parcial deste estudo por parte do FEDER, programa COMPETE, por fundos nacionais da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do projeto de investigação RECI/ECM-HID/0371/2012.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brandão, L. (2015). Modelação Numérica 3D de Escoamentos em Descarregadores de Cheia. Aplicação ao Descarregador de Cheias Complementar do Aproveitamento Hidroelétrico da Caniçada. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 220p

Couto, L.; Muralha, A.; Alvarez, T.; Sardinha, R.; Oliveira, M.; Dias da Silva, J. (2014). Descarregador Complementar da Barragem de Caniçada: Projeto e Ensaios Hidráulicos em Modelo Reduzido. Em 12.º Congresso da Água / 16.º ENASB / XVI SILUBESA. Lisboa. Portugal.

## 13.º Congresso da Água

Couto, L.; Muralha, A.; Melo, J. (2015). Barragem de Caniçada. Descarregador de Cheias Complementar. Ensaios Hidráulicos em Modelo Reduzido. Relatório 276/2015, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Portugal.

Muralha, A.; Brandão, L.; Couto, L. (2014). Barragem de Caniçada. Descarregador de Cheias Complementar: Medições em Modelo Hidráulico Reduzido para Calibração de Modelo Numérico. Nota Técnica 04/2014, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Portugal.

Oliveira, M. S.; Oliveira, J.; Fernandes, I. (2012). Revisão do Estudo das Cheias e Análise da Adequação dos Descarregadores das Barragens do Sistema Cávado-Rabagão-Homem. Em 11º Congresso da Água, Porto.

Oliveira, M. S.; Dias da Silva, J. (2012). New Spillways of Paradela, Salamonde and Caniçada Dams. In 4<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto.

Silva, M. R.; Couto, L.; Pinheiro, A. N.; (2014). Complementary Spillway of Salamonde Dam. Physical and 3D Numerical Modelling. In 3<sup>rd</sup> IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, 2014, Porto.