

## **A INVESTIGAÇÃO SOBRE MODELAÇÃO HIDRÁULICA NO LNEC E O PROGRAMA NACIONAL DE BARRAGENS COM ELEVADO POTENCIAL HIDROELÉTRICO**



**TERESA VISEU**  
Doutorada  
LNEC  
Lisboa - Portugal



**LOURENÇO MENDES**  
Mestre  
LNEC  
Lisboa - Portugal



**SILVIA AMARAL**  
Mestre  
LNEC  
Lisboa - Portugal

### **SUMÁRIO**

A construção das barragens integradas no PNBEPH e o reforço de potência de aproveitamentos existentes constituíram desafios importantes à engenharia portuguesa. No LNEC, a par da realização de um número significativo de modelos físicos, foi possível assistir-se ao crescimento da modelação numérica, validada com base na modelação física. Foram ainda realizados avanços na investigação na área das estruturas hidráulicas que se devem à possibilidade de utilização de tecnologia avançada para medição de grandezas hidráulicas. Nesta comunicação apresentam-se alguns aspetos relevantes dos estudos realizados pelo LNEC no apoio ao projeto de aproveitamentos hidroelétricos recentes.

### **1. INTRODUÇÃO**

Desde a sua criação, em 1946, o LNEC tem dado um apoio significativo ao projeto de aproveitamentos hidroelétricos, tanto em Portugal como no estrangeiro, em estudos relacionados com a definição e otimização de formas hidráulicas, utilizando modelação física e numérica. Apenas a título de exemplo podem destacar-se os estudos das barragens do Cabril (135 m de altura), Alto Lindoso (110 m de altura) e Alqueva (96 m de altura e uma albufeira com cerca de 4.000 hm<sup>3</sup>), em Portugal e a barragem de Cahora Bassa (170 m de altura e uma albufeira com cerca de 66.000 hm<sup>3</sup>), em Moçambique.

Com o objetivo de reduzir a dependência energética de Portugal, retomou-se, recentemente, o plano de construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos e o reforço de potência de

alguns aproveitamentos existentes. Assim, a engenharia portuguesa entra num novo ciclo de grandes obras para aproveitar o potencial dos rios com a construção de uma dezena de barragens hidroelétricas nas bacias do Douro, Mondego e Tejo e de reforços de potência nas bacias do Cávado (nomeadamente o associado à barragem de Salamonde), Douro e Guadiana. Assim, em concurso promovido em 2008, no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), foram concessionadas as barragens de Foz Tua, Alvito, Alto Tâmega, Daivões, Gouvães e Fridão, Girabolhos e Bogueira. Nessa altura encontravam-se já em fase de projeto as barragens de Ribeiradio e Ermida, no rio Vouga, as barragens de montante e de jusante do Baixo Sabor e a nova barragem do Alto Ceira.

Este novo ciclo constitui um desafio importante à engenharia portuguesa, quer pelo número e dimensão das obras, quer pela necessidade de recorrer a tecnologias mais avançadas para satisfazer os requisitos dos estudos. No Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, a par da realização de um número significativo de modelos físicos, foi possível assistir-se ao crescimento da modelação numérica, validada com base em modelação física. Foram ainda realizados avanços na investigação na área das estruturas hidráulicas que se devem sobretudo à utilização de novas metodologias de medição assim como de instrumentação tecnologicamente avançada de monitorização, análise e registo de grandezas hidráulicas.

## 2. LOCALIZAÇÃO E CARATERIZAÇÃO GERAL DAS BARRAGENS

Na Figura 1 representa-se a localização de algumas barragens que foram recentemente estudadas em modelo físico reduzido. A maior parte destes estudos correspondem a barragens inseridas no PNBEPH, nomeadamente os relativos aos descarregadores dos aproveitamentos de Foz Tua (estando-se também a ensaiar o circuito de produção de energia), Daivões, Alto Tâmega, Fridão (escalões de montante e jusante) e o sistema de Bogueira-Girabolhos (*vide* [1]). Os estudos em modelo reduzido dos descarregadores das barragens do Baixo Sabor (escalões de montante e jusante), Alto Ceira e Ribeiradio encontram-se concluídos, estando igualmente em fase de conclusão os estudos referentes ao reforço de potência de Salamonde.

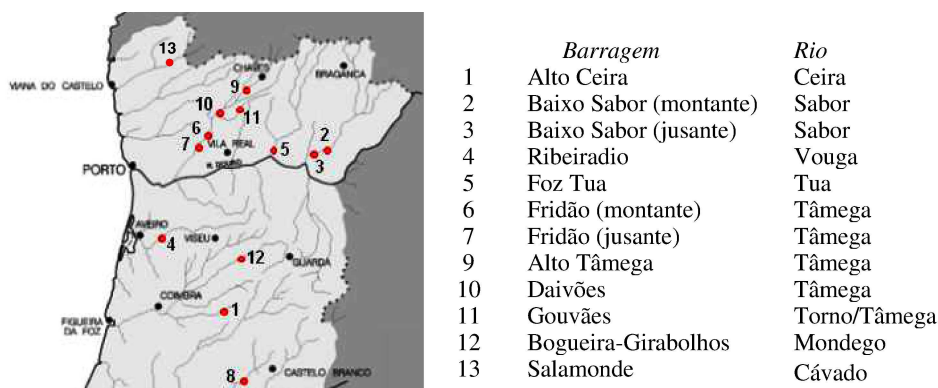


Figura 1: Localização dos descarregadores de cheias estudados em modelo reduzido ([1]).

Na Tabela 1 sintetizam-se as principais características das barragens cujos descarregadores de cheia foram objeto de estudo em modelo reduzido, nomeadamente o tipo estrutural, a altura, a capacidade para o nível de pleno armazenamento (NPA), a potência a instalar e a empresa concessionária ([1]). A EDP tem a concessão de oito obras, a IBERDROLA explorará duas barragens e a ENDESA terá a responsabilidade de explorar o sistema de Girabolhos-Bogueira. Na Figura 2 apresentam-se algumas fotografias dos modelos reduzidos ensaiados no LNEC.



Figura 2: Modelos físicos reduzidos de descarregadores em fase de ensaio no LNEC.

Tabela 1: Características gerais das barragens estudadas em modelo reduzido ([1]).

<i>Barragem</i>	<i>Tipo</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Capacidade (hm<sup>3</sup>)</i>	<i>Potência (MW)</i>	<i>Concessionário</i>
Alto Ceira	Abóbada	41,00	1,5	-	EDP
Sabor (montante)	Abóbada	123,00	1095,0	171	
Sabor (jusante)	Gravidade	45,00	30,0	31	
Ribeiradio	Arco-gravidade	83,00	136,4	72	
Foz Tua	Abóbada	108,00	106,1	262	
Fridão (montante)	Abóbada	98,00	195,5	238	
Fridão (jusante)	Gravidade	34,00	5,3	-	
Salamonde	Arco-abóbada	75,00	56,0	207	
Alto Tâmega	Abóbada	106,50	131,7	160	IBERDROLA
Daivões	Gravidade	77,50	56,0	114	
Bogueira	Aterro	70,0	65,3		ENDESA
Girabolhos	Abóbada	105,50	143,0	355	

### 3. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO DOS ÓRGÃOS HIDRÁULICOS

#### 3.1 Objetivos da modelação física em estruturas hidráulicas

A análise do comportamento do escoamento em estruturas hidráulicas, com base em modelos físicos, constitui uma metodologia adequada, sendo tanto mais justificada quanto mais importante forem os investimentos associados à obra. Do ponto de vista do dimensionamento de estruturas, estes estudos permitem validar ou otimizar as soluções de projeto, permitindo adicionalmente, garantir ou aumentar a eficiência, economia e segurança dos aproveitamentos.

Os estudos em modelo físico reduzido visam essencialmente analisar as condições gerais de funcionamento hidráulico e caracterizar as ações hidrodinâmicas que se exercem sobre as fronteiras sólidas do escoamento, nomeadamente, sobre os descarregadores de cheias, descargas de fundo, tomadas de água e circuitos hidráulicos. Na grande maioria dos casos, os estudos em modelo físico resultam na definição formas alternativas ao projeto que apresentam um melhor desempenho hidráulico (Figura 3) ou, que mantêm este desempenho, mas representam uma maior economia na construção do aproveitamento.



Figura 3: Modelo físico de um descarregador frontal. Abordagem empírica para definição de formas alternativas no caso dos muros-guia na entrada.

Embora utilizados mais frequentemente no estudo de descarregadores de cheias, os modelos físicos reduzidos podem servir, igualmente, para estudar o escoamento em descargas de fundo e em circuitos hidroeléctricos, nomeadamente nas tomadas de água e restituições.

#### 3.2 Estudos realizados

Os estudos de análise hidráulica para apoio ao projeto das novas barragens compreenderam a análise de soluções descarregadoras muito diversas, nomeadamente e no que diz respeito ao tipo de descarga:

- quatro lâminas livres associadas aos descarregadores de cheia dos escalões de montante dos aproveitamentos de Sabor e de Fridão e ainda aos descarregadores dos aproveitamentos de Foz Tua e de Alto Ceira;
- quatro lâminas guiadas associadas aos descarregadores de cheia dos escalões de jusante dos aproveitamentos de Sabor e de Fridão e ainda aos descarregadores dos aproveitamentos de Ribeiradio e de Daivões;
- dois canais de encosta associados aos descarregadores de cheia dos aproveitamentos de Bogueira e de Girabolhos;
- uma galeria associada ao descarregador de cheia principal do aproveitamento de Alto Tâmega.

Também em termos de dissipação de energia as soluções testadas são diversas contemplando bacias de impacto, bacias de dissipação, saltos de esquí e conchas rolo com blocos. À exceção das soleiras dos descarregadores de cheia das barragens do Alto Ceira, Bogueira e Girabolhos todas as restantes soleiras dos descarregadores das barragens estudadas são controladas por comportas.

Os estudos foram conduzidos em função da especificidade de cada uma das soluções testadas, mas consideraram, de uma forma geral, os seguintes aspetos:

- análise das condições do escoamento na aproximação e sobre as soleiras descarregadoras, bem como melhoria da capacidade de vazão por eliminação de eventuais contrações introduzidas por pilares e muros-guia;
- determinação do campo de pressões nas soleiras descarregadoras e nas bacias de impacto;
- determinação de curvas de vazão (com abertura total e, eventualmente, parcial das comportas) e definição da lei de abertura das comportas;
- caracterização do campo de pressões (médias e flutuações) nas fronteiras sólidas com o escoamento, nomeadamente nas bacias de impacto;
- determinação do alcance de jatos descarregados;
- análise do funcionamento e melhoria da eficiência de soluções de dissipação de energia (bacias dissipação por ressalto hidráulico ou de impacto, saltos de esquí e conchas por rolos);
- estudo das erosões a jusante do descarregador e medições de velocidades nas restituições de caudais.

Os ensaios em modelo reduzido dos circuitos hidráulicos para produção de energia de Foz Tua e de reforço de potência de Salomonde (Salomonde II) tiveram por objetivo a análise das condições de escoamento à entrada e à saída dos mesmos, tanto em turbinamento como em bombagem, e incluíram a medição pontual de velocidades no plano das grades e das pressões médias do escoamento em diversos pontos de interesse. Nas tomadas de água foram, igualmente, realizados estudos para verificação da eventual tendência para a formação de vórtices e para definição de soluções que impeçam ou contrariem a respetiva ocorrência.

## **4. INVESTIGAÇÃO SOBRE MODELAÇÃO HIDRÁULICA DE ESTRUTURAS**

### **4.1 Considerações iniciais**

Atualmente, a análise do comportamento do escoamento em estruturas hidráulicas com base em modelos físicos reduzidos continua a desempenhar um papel fundamental no dimensionamento destas estruturas. Com efeito, os escoamentos em estruturas hidráulicas são altamente turbulentos e, por vezes, caracterizados por um emulsionamento de ar significativo.

Dada a complexidade deste tipo de escoamentos, a via experimental continua a ser de crucial importância na análise e caracterização deste tipo de escoamentos. Recentemente deram-se grandes avanços na área de investigação de estruturas hidráulicas, sobretudo, devido à possibilidade de utilização de meios informáticos mais potentes e de instrumentação de monitorização tecnologicamente mais avançada. As novas metodologias e instrumentação vieram incrementar a qualidade das medições, assim como possibilitar a medição de algumas variáveis em situações que anteriormente não eram possíveis de realizar. Por outro lado, técnicas de análise de imagem auxiliadas por meios informáticos robustos possibilitaram um salto quantitativo na visualização/interpretação do escoamento.

Os recentes avanços das capacidades dos modelos computacionais e dos computadores abrem, igualmente, novas portas para a investigação numérica de escoamentos em estruturas hidráulicas.

Assim, a inovação e a investigação na modelação do escoamento em estruturas hidráulicas assentam essencialmente em duas áreas:

- na aplicação de novas tecnologias de medição e registo de grandezas físicas para uso em modelos físicos reduzidos;
- no desenvolvimento e aplicação de modelos numéricos aplicados às situações ensaiadas em modelo físico.

### **4.2 Novas tecnologias de medição e registo de grandezas físicas**

A abordagem de índole física tem dado passos de importantes nos anos mais recentes no que se relaciona com as técnicas de aquisição e registo de grandezas físicas, nomeadamente de alturas de água, velocidades do escoamento, caudais e pressões atuantes nas estruturas.

Nos modelos físicos constitui uma prática comum medir as pressões com piezómetros e as velocidades pontuais por recurso a molinetes ou micro-molinetes, uma vez que são dispositivos que combinam uma facilidade de utilização com um bom grau de fiabilidade. Muitas vezes utilizam-se descarregadores Bazin para a medição de caudais, ou seja, utilizam-se procedimentos de aquisição de dados essencialmente manuais que envolvem recursos humanos importantes para apoio na experimentação.

Nos anos mais recentes, têm sido gradualmente realizados investimentos no estudo e teste de novos sistemas de aquisição de grandezas em instalações hidráulicas e de software de

processamento de dados que permitem, em particular, dar a conhecer o campo de velocidades e das pressões por instrumentação “não invasiva”, melhorando, em simultâneo, o conhecimento de novas técnicas de medição em modelação física. Assim, e frequentemente na sequência de investigação realizada no âmbito de instalações experimentais de apoio a teses de doutoramento, tem-se generalizado, aos modelos físicos, o uso de transdutores de pressão para medição de pressões e de alturas de água ([2] e [3]) bem como o uso de caudalímetros para medição de caudais, caminhando-se, para o mesmo efeito, para a multi-sensorização dos níveis e das velocidades. O notável desenvolvimento da instrumentação permitiu, igualmente, a medição da turbulência em escoamentos não-arejados, nomeadamente utilizando equipamentos de ADV (*acoustic doppler velocimeter*) ou PIV (*particle image velocimetry 2D*), e a medição da concentração e velocidade do ar em escoamentos arejados, recorrendo a sondas de condutividade eléctrica, sondas ópticas e tubos de Pitot com funcionamento em contra-pressão. Assim, têm sido testados, com sucesso, sensores, nomeadamente para determinar o campo de velocidades do escoamento e, a partir daí, estudar a turbulência do escoamento e determinar parâmetros característicos do escoamento. Constituem exemplo destes sensores os velocímetros da categoria dos ADV, nomeadamente utilizando sondas UVP (sondas ultrasónicas de velocidade) e vectrinos ([4], [5] e [6]) – *vide* Figura 4.

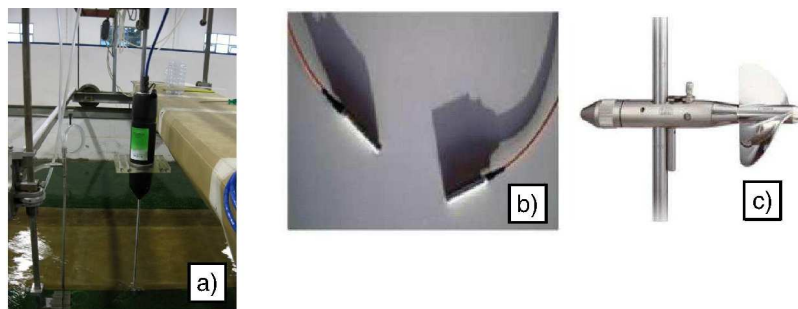


Figura 4: Sondas para medição de velocidades: a) vectrino; b) sondas UVPs; c) molinete.

Note-se que no caso da utilização destas tecnologias, a caracterização cabal do campo de velocidades pode obrigar não só à medição de perfis de velocidades em diversas secções (e, em cada secção, segundo direcções distintas), mas igualmente ao desenvolvimento de rotinas para o pós-processamento dos dados de velocidade adquiridos. A este propósito, ver, a título de exemplo, a sequência de passos necessária para caracterizar o campo de velocidades no poço de bombagem do circuito do reforço de potência da barragem e Salamonde, que consta da Figura 5.

A tecnologia ADV apresenta um inconveniente: a morosidade do processo, que obriga ao reposicionamento do equipamento em cada um dos pontos de medição. Desta forma, dispondo o LNEC de instalações com alimentação em circuito fechado, está em processo de teste a utilização de equipamento PIV para efectuar medições do campo de velocidades. O PIV é um equipamento “não intrusivo” que permite obter campos de velocidades instantâneas, através do registo fotográfico da posição de partículas suspensas no escoamento em dois instantes de tempo consecutivos. É aplicável a medições em escoamentos com elevada heterogeneidade espacial, o que permitirá aumentar o rigor e reduzir o tempo de aquisição das medições a realizar.

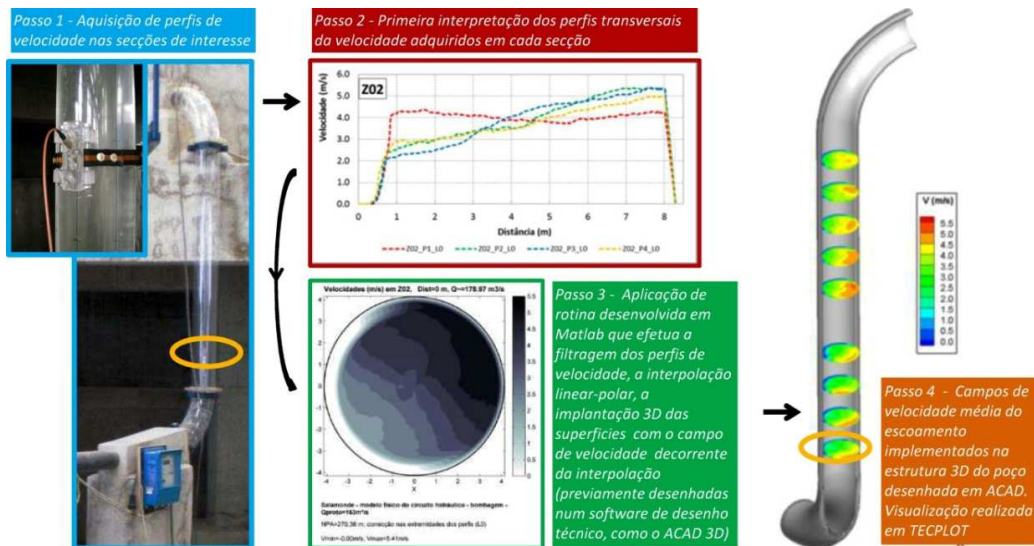


Figura 5: Modelo físico de Salamonde II. Processo de aquisição e cálculo do campo de velocidades ao longo do poço de bombagem.

#### 4.3 Modelação numérica dos escoamentos em estruturas hidráulicas

A forma de abordagem com base na modelação numérica aplicada à simulação de escoamentos com superfície livre em estruturas hidráulicas com fronteiras complexas tem constituído, nos anos mais recentes, um desafio de investigação. Com efeito, tratam-se de estruturas onde a geometria e o tipo de escoamentos são complexos e onde a intensidade da turbulência, o campo de velocidades (rapidamente variáveis) e as pressões são frequentemente impostos pela geometria de canais e túneis e pelas estruturas de dissipação de energia. Assim, a hidrodinâmica deste tipo de escoamentos levanta diversos problemas para a modelação numérica nomeadamente no que se refere à coexistência de regimes lentos e rápidos, ao desenvolvimento da camada limite turbulenta e à incorporação e arrastamento de ar, bem como ao facto da posição da superfície livre ser desconhecida.

Por estas razões, a modelação numérica do escoamento em descarregadores continua a ser pouco frequente mas, não obstante estas dificuldades, o avanço da tecnologia computacional das últimas décadas tem permitido, para algumas condições, a resolução numérica das equações representativas dos escoamentos, sendo nos dias de hoje possível encontrar simulações do escoamento tridimensional, multifásico, transiente, turbulento.

De salientar nesta área, o grande desenvolvimento dos modelos da dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD, na terminologia inglesa) que constituem já hoje ferramentas capazes de simular numericamente os fenómenos de transporte em escoamentos em muitos domínios de simulação e têm sido cada vez mais utilizados em hidráulica. Permitem a comparação do desempenho de múltiplas geometrias alternativas antes da construção do modelo físico, a interacção com o modelo físico através de processos de



validação, a calibração do modelo numérico e o estudo configurações complementares à solução final do modelo físico. Resumidamente, os modelos CFD proporcionam o estudo de maior número de soluções em menos tempo e com menos recursos materiais.

No LNEC, as simulações numéricas do escoamento em estruturas hidráulicas têm sido realizadas recorrendo ao software comercial de CFD, FLOW-3D, que permite modelar escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis ou incompressíveis em regime permanente ou variável. O FLOW-3D utiliza o método FAVOR<sup>TM</sup> para representar os objetos sólidos, que permite modelar de forma muito simples obstáculos de geometria complexa. Com este método, a construção das malhas e dos sólidos é independente, podendo-se facilmente alterar os obstáculos sem alterar a malha e vice-versa. Este software utiliza ainda o método TruVOF<sup>TM</sup> para a localização da superfície livre, que tem a vantagem de, comparado com outros métodos, considerar, para efeitos de cálculo, apenas as células que contêm fluido, resultando numa maior rapidez e menor gasto de memória.

As Figuras 6 e 7 ilustram a modelação física e numérica por recurso ao modelo FLOW-3D do escoamento na chaminé de equilíbrio de Salomonde II. Esta metodologia permitiu uma análise mais pormenorizada ao campo de velocidades e ao campo de pressões, resultando numa compreensão mais detalhada dos fenómenos responsáveis pela perda de carga nesta estrutura.



Figura 6: Chaminé de equilíbrio de Salomonde II. Modelo físico.

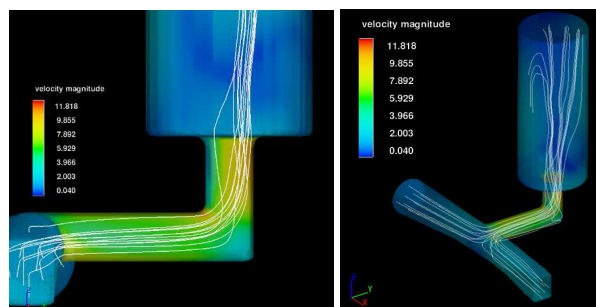


Figura 7: Chaminé de equilíbrio de Salomonde II. Resultados do modelo numérico: magnitude da velocidade e linhas de corrente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção das barragens integradas no PNBEPH tem constituído um grande desafio à engenharia portuguesa, quer pelo número e dimensão das obras, quer pela necessidade de recorrer a tecnologias mais eficazes para satisfazer os requisitos dos estudos a realizar.

Presentemente, estão a ser conduzidos no LNEC vários estudos hidráulicos em modelo físico reduzido de aproveitamentos, nomeadamente, alguns dos inseridos no PNBEPH nomeadamente os relativos aos descarregadores dos aproveitamentos de Foz Tua (está também em fase de ensaio o circuito de produção de energia), Daivões e Alto Tâmega. Prevê-se a curto prazo o início do estudo em modelo reduzido dos descarregadores de Girabolhos e de Fridão (escalões de montante e jusante). Os estudos em modelo físico dos órgãos hidráulicos dos descarregadores das barragens do Alto Ceira, Baixo Sabor (escalões de montante e jusante) e Ribeiradio encontram-se concluídos.

Estes estudos em modelo físico permitiram realizar um investimento forte nas técnicas e meios de medição (sensores, tratamento de imagens e medições em tempo real) que se revelou fundamental para obter ganhos de precisão nos resultados e, assim, alargar o espectro de aplicação. Foi, igualmente, possível assistir-se ao crescimento da modelação numérica, validada com base na modelação física. Assim, a combinação de modelos numéricos e modelos físicos pode representar ganho de eficácia e eficiência, sem que o papel inegável da modelação física seja desvalorizado.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se às empresas EDP – Energias de Portugal, Iberdrola e Endesa e aos investigadores do LNEC responsáveis pelo desenvolvimento de estudos em modelo físico, nomeadamente aos Engenheiros José Falcão de Melo (modelos do Sabor e Fridão – escalões de montante e de jusante), Elsa Alves (modelos de Ribeiradio, Daivões e Bogueira), João Rocha (Alto Ceira e Alto Tâmega) e Lúcia Couto e João Fernandes (modelo de Salamonde).

Agradece-se ainda aos experimentadores do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do LNEC responsáveis pela condução dos ensaios: Guilhermino Lisboa, Mateus Mendonça, Leandro Valente, Edgar Santos, Adelaide Gonçalves e Susana Almeida.

## REFERÊNCIAS

- [1]. Pina, C.; Lemos, J.V.; Lamas, L.; Batista, A.L. e Viseu, T. – “Contributo do LNEC nos estudos de apoio ao projeto recente de doze grandes barragens de betão”. *Proceedings do Encontro Nacional de Betão Estrutural (BE2012)*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), outubro, 2012.
- [2]. Viseu, T. – “Segurança dos Vales a Jusante de Barragens. Metodologias para Apoio à Gestão do Risco”. *Tese de doutoramento em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, janeiro, 2006.

- [3]. Melo, J.F. – “Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacias de dissipação de energia por jactos”. *Tese de doutoramento em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, dezembro, 2001.
- [4]. Alves, E. – “Sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez”. *Tese de doutoramento em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, dezembro, 2008.
- [5]. Fernandes, J.N.; Leal, J.B; Cardoso, A.H.; Pinto – “Escoamento em Canais de secção composta – Caracterização experimental e modelação 1D”. *Proceedings do 10º Congresso da Água*, Alvor, março, 2010.
- [6]. Beceiro, P.; Amaral, S. – “Pequeno manual de uso de sondas ultrasónicas para la medición de perfiles de velocidad instantánea (UVP) - UVP Monitor – Model UVP DUO – MetFlow”. *Manual para uso interno*, LNEC, Lisboa, outubro, 2011.