

# 30\_32

## O LNEC

# APOIO DO LNEC AO PROJETO E CONSTRUÇÃO RECENTE DE GRANDES BARRAGENS DE BETÃO E OBRAS SUBTERRÂNEAS

António Lopes Batista, José Vieira de Lemos, Luís Lamas, António Tavares de Castro  
LNEC

### 1. INTRODUÇÃO

Desde a sua criação, em 1946, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem dado um apoio significativo ao projeto e à construção de barragens de betão e obras subterrâneas associadas, tanto em Portugal como no estrangeiro, em estudos e atividades relacionados com a caracterização dos maciços rochosos, a definição de formas estruturais e hidráulicas, utilizando modelação física e matemática, a análise estrutural por métodos experimentais e numéricos, e na observação do comportamento e no controlo da segurança das obras.

No sentido de reduzir a dependência energética de Portugal, nos últimos anos tem vindo a ser aumentada a capacidade de produção hidroelétrica, com o reforço de potência de aproveitamentos existentes e com a construção de novos aproveitamentos. Destacam-se cinco reforços de potência e novos aproveitamentos que integram doze grandes barragens de betão (Figura 1), destinando-se a barragem do Alto Ceira II a substituir a antiga, que já não era possível reabilitar. O LNEC foi novamente solicitado a dar apoio ao projeto estrutural e hidráulico e à implementação do plano de observação das obras. Decorrente das suas atribuições no Regulamento de Segurança de Barragens (RSB),

o acompanhamento do comportamento das obras pelo LNEC prossegue no primeiro enchimento da albufeira, que constitui um verdadeiro ensaio de carga das estruturas e fundações, e prolonga-se nas fases de exploração e eventual abandono e demolição, por forma a garantir-se a segurança em todas as fases de vida. Para tal dispõe de um sistema integrado de arquivo e gestão da informação relativa à observação do comportamento das obras, que suporta o controlo da segurança nas vertentes estrutural, hidráulica e ambiental.

A intervenção do Departamento de Barragens de Betão (DBB) do LNEC no apoio ao projeto estrutural destas obras envolveu um vasto conjunto de atividades, nomeadamente o estudo dos maciços rochosos, os estudos em modelo matemático para análise da segurança estrutural, considerando os três cenários principais (as ações sísmicas, a degradação do betão e a rotura pelo maciço rochoso de fundação) e a elaboração de planos de observação. Estes estudos foram realizados diretamente para os concessionários ou para as empresas encarregues da elaboração dos projetos.

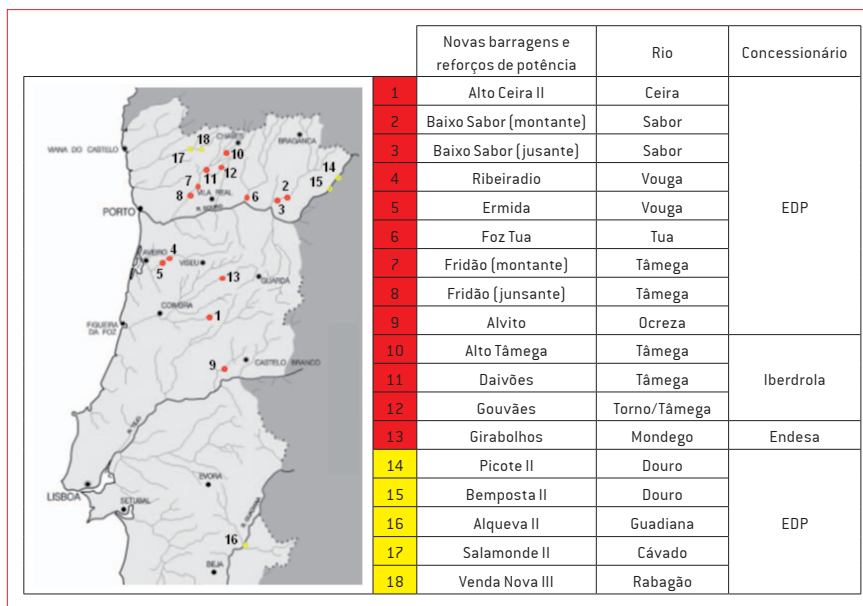
A atividade do LNEC na construção das obras tem sido de carácter diversificado, nomeadamente na caracterização do comportamento de materiais, no acompanhamento das escavações de fundações e de obras subterrâneas

associadas e na implementação dos planos de observação.

### 2. ESTUDOS DE APOIO AO PROJETO

Para caracterização geomecânica dos maciços rochosos de fundação das barragens, bem como das obras subterrâneas associadas (circuitos hidráulicos e centrais subterrâneas), foi realizado um vasto conjunto de estudos, incluindo principalmente ensaios de campo e de laboratório. Estes estudos incluíram: levantamentos da compartimentação dos maciços de fundação; caracterização da deformabilidade dos maciços rochosos por diversos tipos de ensaios de campo; e medição do estado de tensão *in situ* para as obras subterrâneas utilizando a combinação de várias metodologias. Foi executado um grande número de ensaios laboratoriais para caracterização da resistência e da deformabilidade, quer de provetes de rocha quer das superfícies de descontinuidade do maciço.

Os estudos de análise estrutural para apoio ao projeto das novas barragens compreenderam a análise em modelos numéricos das diversas situações de projeto, nomeadamente de cenários correntes de exploração e de cenários de rotura, tendo-se centrado principalmente nestes últimos. Foram utilizados os métodos dos



> 1

elementos finitos, das diferenças finitas e dos elementos discretos, que foram escolhidos em função dos objetivos dos estudos (Figuras 2 e 3). Nas obras subterrâneas modelou-se o comportamento deformacional nas fases de escavação e colocação dos suportes (Figura 4). O LNEC elaborou ainda os planos de observação de diversas barragens, a pedido dos concessionários, e reviu os que não elaborou, no âmbito da intervenção definida pelo RSB para as barragens de maior risco potencial, incluídas na classe I daquele regulamento.

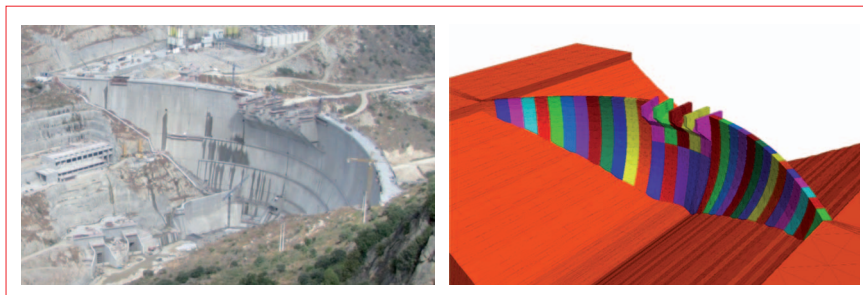
### 3. ACOMPANHAMENTO DA CONSTRUÇÃO

Devido ao pequeno investimento realizado nas últimas décadas na construção de grandes barragens de betão, existe uma experiência limitada nas empresas de projeto, construção civil e fiscalização, em instrumentação de barragens. Neste contexto, a EDP, o maior concessionário de grandes aproveitamentos hidroelétricos, decidiu recorrer aos serviços do LNEC, através do DBB, para a constituição de equipas especializadas de instrumentação (EEI). Estas equipas, que integram técnicos permanentemente deslocados nas obras, assumem particulares responsabilidades em todas as atividades relacionadas com a instrumentação e a observação das obras.

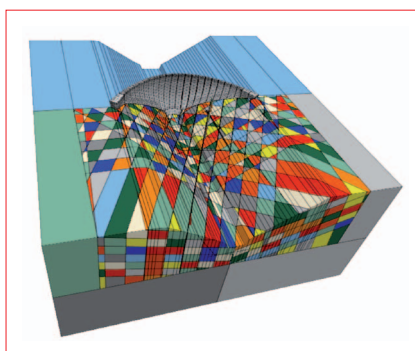
No que respeita às obras subterrâneas, o LNEC tem vindo a acompanhar a realização das escavações, a implementação dos sistemas de observação e o primeiro enchimento e entrada em funcionamento das obras.

Destaca-se ainda um protocolo de colaboração entre a EDP e o Departamento de Materiais do LNEC, ao abrigo do qual são realizados estudos específicos sobre os materiais a utilizar nas obras em construção ou em reabilitação.

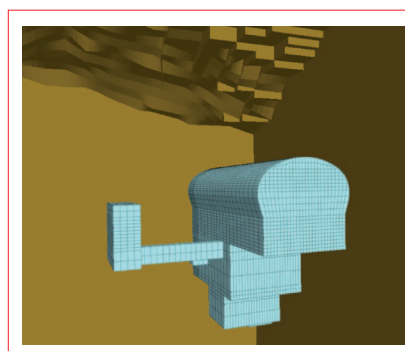
Deve também ser referida a colaboração do Departamento de Geotecnia do LNEC na realização de ensaios para controlo da qualidade dos trabalhos de tratamento das fundações rochosas.



> 2



> 3



> 4

> Figura 1: Localização das treze novas barragens de betão e dos cinco reforços de potência.

> Figura 2: Barragem de montante do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Vista da obra no final da construção e perspetiva do modelo de elementos discretos utilizado no estudo do comportamento sísmico.

> Figura 3: Perspetiva do modelo da barragem de Girabolhos, utilizado para estudo de cenários de rotura pela fundação, considerando blocos no maciço rochoso e elementos finitos na barragem.

> Figura 4: Perspetiva do modelo numérico da central subterrânea de Salamonde II, utilizado para o acompanhamento das escavações.

Finalmente salienta-se a colaboração do DBB na definição dos sistemas de observação geodésica e na realização de campanhas para a medição de deslocamentos na generalidade das grandes obras.

#### 4. SÍNTESE DAS ATIVIDADES REALIZADAS

No Quadro 1 apresenta-se uma síntese das atividades realizadas pelo LNEC, nos últimos anos, no apoio ao projeto de treze grandes barragens de betão portuguesas, bem como na construção de seis delas.

Nos reforços de potência de Picote II, Bemposta II e Alqueva II, levados a efeito entre 2006 e 2012, o LNEC efetuou a caracterização dos maciços rochosos, fez estudos de apoio ao projeto e acompanhou a realização das escavações, a implementação dos sistemas de observação e a entrada em funcionamento das obras. Para as obras similares em curso, nomeadamente Salamonde II, Venda Nova II e Foz Tua, o envolvimento do LNEC tem sido, em tudo, semelhante.

#### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto e a construção, nos últimos anos, de barragens de betão e de obras subterrâneas integradas em aproveitamentos hidroelétricos, constituíram um desafio importante para a engenharia portuguesa, quer pelo número e dimensão das obras, quer pela necessidade de recorrer a tecnologias adequadas para satisfazer os requisitos de segurança, ambientais e económicos. O LNEC teve um envolvimento significativo nos estudos de apoio ao projeto, nas suas diversas vertentes, desde a prospeção dos locais de implantação das obras até à modelação dos comportamentos estruturais e hidráulicos, bem como na definição ou revisão de planos de observação e de primeiro enchimento. O apoio do LNEC, que tem prosseguido na construção, primeiro enchimento das albufeiras e exploração das obras, tanto nas atividades que decorrem das suas obrigações legais no âmbito do cumprimento do RSB como em outros aspetos relacionados com o comportamento das obras, tem motivado a investigação e a inovação, através de diferentes tipos de desen-

volvimentos teóricos e experimentais.

A atividade do LNEC tem permitido, para além da garantia da qualidade das obras e o controlo continuado da sua segurança, a manutenção de capacidades numéricas e laboratoriais, assentes num corpo técnico especializado, constituído por investigadores e experimentadores. Estas capacidades têm estado ao serviço dos diferentes agentes envolvidos na engenharia de barragens, nomeadamente donos de obra, empresas de construção e de fiscalização, bem como autoridades estatais responsáveis pelo acompanhamento das obras, tanto em Portugal como no estrangeiro.

#### 6. NOTA

Colaboraram nos estudos referidos, para além dos autores, os investigadores do DBB Carlos Serra, Eduardo Bretas, Eliane Portela, Ivo Dias, João Casaca, Jorge Pereira Gomes, José Muralha, José Nuno Lima, José Piteira Gomes, Margarida Espada, Maria Luísa Braga Farinha, Noemi Leitão, Nuno Azevedo, Ricardo Resende, Romano Câmara e Sérgio Oliveira. ■

> Quadro 1: Estudos realizados pelo LNEC para apoio ao projeto e construção recente de grandes barragens de betão

Barragem	Tipo estrutural	Altura máxima (m)	Caracterização geomecânica do local de implantação	Análise de cenários correntes e de rotura	Elaboração (E) ou revisão (R) de planos de observação (PO) e de primeiro enchimento (PE)	Acompanhamento da construção
Alto Ceira II	Abóbada	41,00	1992	2008 e 2011	RPO (2007) RPE (2013)	2011 a 2013
Baixo Sabor (montante)	Abóbada	123,00	2004 e 2005	2008	RPO (2008) RPE (2013)	EEl (2011 a 2014)
Baixo Sabor (jusante)	Gravidade	45,00	2004 e 2005	2008	RPO (2008 e 2013) RPE (2014)	EEl (2011 a 2014)
Ribeiradio	Arco-gravidade	83,00	2009	2009 e 2014	RPO (2010) RPE (2014)	EEl (2012 a 2014)
Ermida	Gravidade	35,00	—	—	RPO (2010) RPE (2014)	EEl (2012 a 2014)
Foz Tua	Abóbada	108,00	2010	2010	RPO (2010)	EEl (2013 a 2015)
Fridão (montante)	Abóbada	98,00	1989	2011	RPO (2013)	(*)
Fridão (jusante)	Gravidade	34,00	2009	-	RPO (2013)	(*)
Alvito	Gravidade (BCC)	89,00	2010	2011	EPO (2010)	(*)
Alto Tâmega	Abóbada	106,50	2010 e 2011	2010 e 2014	EPO (2011)	(*)
Daivões	Arco-gravidade	77,50	2010 e 2011	2011	EPO (2011)	(*)
Gouvães	Gravidade	30,00	2010	—	EPO (2011)	(*)
Girabolhos	Abóbada	105,50	—	2011	EPO (2011)	(*)

(\*) Barragens cuja construção ainda não foi iniciada em meados de 2014

