



QIC2016

2º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Lisboa • LNEC • 21 a 24 de novembro de 2016

ASPETOS RELEVANTES DO APOIO DO LNEC À EDP NA INSTRUMENTAÇÃO DAS BARRAGENS DE BETÃO CONSTRUÍDAS ENTRE 2011 E 2016

António Lopes Batista

Engº Civil, LNEC, Lisboa, a.l.batista@lneec.pt

Domingos Silva Matos

Engº Civil, EDP Produção, Porto, domingossilva.matos@edp.pt

Resumo

Apresentam-se os aspetos relevantes do apoio do LNEC à EDP Produção (EDPP) na instrumentação das recentes barragens de betão, no que respeitou à partilha de responsabilidades na execução deste tipo de trabalhos, designadamente através do apoio realizado pelo LNEC às equipas de projeto, coordenação de obra e fiscalização no âmbito da implementação dos planos de observação, durante a construção das cinco barragens integradas nos aproveitamentos hidroelétricos do Baixo Sabor, Ribeiradio-Ermida e Foz Tua, que decorreu entre março de 2011 e abril de 2016.

Para o efeito foram constituídas pelo LNEC equipas especializadas de instrumentação (EEI), mobilizando técnicos deslocados permanentemente nas obras, com o objetivo de complementar o trabalho da fiscalização neste domínio específico, com coordenação de investigadores com afetação parcial, que garantiram a ligação às equipas de supervisão de obra e de projeto da EDPP. As EEI foram responsáveis pela apreciação de planos de instrumentação, análise de propostas relativas a instrumentos e acessórios dos sistemas de observação, verificação do funcionamento de dispositivos de resistência elétrica a embeber no betão estrutural, apoio à preparação e instalação de instrumentos de observação embebidos e aparentes, apoio à caracterização das propriedades do betão, acompanhamento de trabalhos específicos de construção e, também, pela constituição e exploração das bases de dados e resultados da observação, utilizando o sistema informático dedicado em uso no LNEC e EDP.

Referem-se alguns apontadores de desempenho conseguidos na instrumentação das cinco barragens e enfatizam-se as vantagens do modelo de interação entre a EDPP e o LNEC que foi seguido, com sucesso e benefícios para ambas as partes.

Palavras-chave: Barragens de betão, planos de observação, construção, instrumentação

Introdução

No sentido de reduzir a dependência energética de Portugal, em 2007 retomou-se a construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos. No que respeita às barragens integradas nos aproveitamentos concessionados à EDP Produção (EDPP), nessa altura estavam em fase de projeto as barragens de Ribeiradio e Ermida, no rio Vouga, as barragens do Baixo Sabor e do Feiticeiro, no rio Sabor, e a barragem do Alto Ceira II, destinada a substituir a antiga obra que estava irremediavelmente deteriorada devido a reações expansivas de origem interna do betão. Em concurso promovido em 2008 pelo estado português, no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), foi também concessionado à EDPP o aproveitamento de Foz Tua, dotado da barragem com o mesmo nome. Todas estas seis barragens são de betão. As barragens do Alto Ceira II, Baixo Sabor e Foz Tua são abóbadas de dupla curvatura, a barragem de Ribeiradio é uma barragem gravidade com curvatura em planta e as barragens do Feiticeiro e de Ermida são do tipo gravidade de eixo retilíneo.

Desde a sua criação, em 1946, o LNEC tem dado um apoio significativo ao projeto, construção, observação e controlo da segurança de barragens de betão, tanto em Portugal como no estrangeiro. Na fase de projeto devem referir-se os estudos relacionados com a caracterização dos maciços rochosos de fundação, a definição de formas estruturais e hidráulicas, utilizando modelação física e matemática, a análise estrutural por métodos experimentais e numéricos, e a elaboração ou revisão de planos de observação. Durante a construção das obras o LNEC tem dado apoio no controlo da qualidade dos materiais, na instrumentação e na realização de outros ensaios. Nas fases de primeiro enchimento das albufeiras e exploração das obras tem apoiado a observação e o controlo da segurança, designadamente através da constituição e exploração das bases de dados e resultados da monitorização e da realização de inspeções. Estas atividades do LNEC têm vindo a ser realizadas ao abrigo de contratos firmados com os donos de obra, mas a partir de 1991, com a entrada em vigor do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2007), para as barragens de maior risco potencial (incluídas na classe I) a intervenção do LNEC tem carácter obrigatório em muitas das atividades de observação e controlo da segurança nas fases de primeiro enchimento da albufeira e exploração. A EDP tem sido o principal interlocutor do LNEC neste âmbito, não só devido ao facto de ser o dono de obra com o maior parque de barragens mas, também, pela relação de complementaridade de intervenção nas obras que se estabeleceu ao longo dos anos.

Nos empreendimentos recentes a EDPP adotou um modelo de empreitada em que, entre outras especificidades, foi atribuída ao adjudicatário a responsabilidade de fornecimento e instalação dos dispositivos que constituem os sistemas de observação das obras. Estes trabalhos foram controlados pela fiscalização, com apoio de uma equipa especializada neste domínio específico. Na barragem do Alto Ceira II esse apoio à fiscalização ficou a cargo da própria EDPP, cabendo ao LNEC um acompanhamento estreito no âmbito das suas atribuições regulamentares.

Na construção das cinco barragens seguintes (Baixo Sabor, Feiticeiro, Ribeiradio, Ermida e Foz Tua), face à afetação dos técnicos da EDPP a outras funções chave nas obras e à escassez no meio empresarial nacional de técnicos especializados em instrumentação, foi acordado entre a EDP e o LNEC uma partilha de responsabilidades na instalação dos sistemas de observação, designadamente através do apoio do LNEC às equipas de projeto, coordenação de obra e fiscalização no âmbito da implementação dos planos de observação. Para o efeito foram constituídas pelo LNEC equipas especializadas de instrumentação (EEI), mobilizando técnicos deslocados permanentemente nas obras, com o objetivo de complementar o trabalho da fiscalização neste domínio específico, com coordenação de investigadores com afetação parcial, que garantiram a ligação às equipas de supervisão de obra e de projeto da EDPP. As EEI foram responsáveis pela apreciação de planos de instrumentação, análise de propostas relativas a instrumentos e acessórios dos sistemas de observação, verificação do funcionamento de dispositivos de resistência elétrica a embeber no betão estrutural, apoio à preparação e instalação de instrumentos de observação embebidos e aparentes, apoio à caracterização das propriedades do betão, acompanhamento de trabalhos específicos de construção e constituição e exploração das bases de dados e resultados da observação, utilizando o sistema informático dedicado em uso no LNEC e EDP.

O LNEC prestou ainda um apoio significativo à EDPP em outros aspetos específicos da instrumentação, designadamente no projeto e instalação de células de fluência e na elaboração dos

planos dos sistemas de observação geodésica e dos sistemas de observação das ações sísmicas e das respostas dinâmicas.

Faz-se uma apresentação sucinta das cinco barragens em apreço e dos seus sistemas de observação, referindo-se de seguida alguns dos aspetos relevantes do apoio do LNEC à EDP na instrumentação das barragens, designadamente o enquadramento e as atividades das EEI, destacando-se a verificação do funcionamento dos dispositivos de resistência elétrica tipo Carlson, os melhoramentos realizados no projeto e instalação de células de fluência, o apoio à definição e implementação dos sistemas de observação sísmica e de monitorização dinâmica em contínuo, e ainda a instalação de sistemas GNSS (Global Navigation Satellite System) para monitorização complementar, em contínuo, de deslocamentos.

Características e planos de observação das cinco barragens

Características das barragens

As barragens do Baixo Sabor e Feiticeiro integram o Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS), localizando-se no trecho inferior do rio Sabor, já perto da confluência com o rio Douro. As centrais das duas barragens são dotadas de sistemas reversíveis em turbinamento-bombagem, por forma a ser possível bombear água do rio Douro, a partir da albufeira da Valeira, para a grande albufeira de armazenamento do Baixo Sabor (1095 hm³ de volume total), usando o escalão intermédio do Feiticeiro. A barragem do Baixo Sabor é uma abóbada de dupla curvatura com uma altura máxima acima da fundação de 123,00 m, um coroamento de 6,00 m de espessura e 505 m de desenvolvimento, à cota 236,00 m. A barragem do Feiticeiro é uma barragem gravidade com uma altura máxima de 45,00 m e um coroamento reto de cerca de 315 m, à cota 138,00 m. O projeto das obras do AHBS foi elaborado pela das EDPP, tendo a COBA dado apoio no projeto de execução da central do Feiticeiro. A construção das duas barragens decorreu entre 2012 e 2014.

O Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida (AHRE), construído entre 2012 e 2015, integra as barragens de Ribeiradio e Ermida, no rio Vouga, no concelho de Sever do Vouga. A barragem de montante, Ribeiradio, tem um perfil de gravidade com curvatura em planta e uma altura máxima de 83,00 m, sendo atualmente a mais alta barragem gravidade portuguesa. O coroamento, à cota de 112,00 m, tem uma espessura de 9,00 m e um desenvolvimento de 265 m. A barragem de Ermida, localizada a jusante da barragem de Ribeiradio, tem 35,00 m de altura e um coroamento reto com 175 m de desenvolvimento. O seu descarregador de superfície é não controlado. O projeto das obras do AHRE foi elaborado pela COBA, com supervisão da EDPP.

A barragem de Foz Tua, integrada no Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua (AHFT), é uma abóbada com uma altura máxima de 108,00 m e um coroamento de 5,00 m de espessura e 275 m de desenvolvimento, à cota 172,00 m. A central é resersível, permitindo a bombagem da água do rio Douro a partir da albufeira da Régua. O projeto das obras do AHFT foi elaborado pela EDPP, tendo a COBA dado apoio no projeto de execução da barragem. A construção das obras do AHFT iniciou-se em 2013 e terminará em 2016.

Quadro 1. Principais características das cinco barragens, albufeiras e centrais

Barragem	Tipo estrutural	Altura (m)	Desenvolvimento do coroamento (m)	Volume teórico de betão (m ³)	Volume da albufeira (hm ³)	Potência instalada no aproveitamento (MW)
Baixo Sabor	Abóbada	123,00	505	670.000	1095	171 (*)
Feiticeiro	Gravidade	45,00	315	170.000	30	31 (*)
Ribeiradio	Gravidade	83,00	265	290.000	136	74,5
Ermida	Gravidade	35,00	175	85.000	4	8
Foz Tua	Abóbada	108,00	275	317.000	106	262 (*)

(*) Sistemas reversíveis turbinamento-bombagem

Aspetos principais dos planos de observação das barragens

Os planos de observação das barragens do Baixo Sabor, Feiticeiro, Ribeiradio, Ermida e Foz Tua foram elaborados pelos projetistas, em estreita interação com o LNEC, tendo em consideração as Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB, 1993). Tratando-se de barragens da classe I, o LNEC realizou a revisão formal destes planos no âmbito das suas atribuições regulamentares.

Os planos de observação incluíram a definição dos sistemas de observação e dos critérios da sua exploração, bem como o planeamento genérico das visitas de inspeção, visando a avaliação das condições de segurança das obras durante as suas fases de vida, nomeadamente a construção, primeiro enchimento da albufeira e exploração. Definiram ainda os estudos específicos de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais das barragens e suas fundações, bem como os meios utilizados na recolha, arquivo e tratamento dos resultados das observações, assim como a forma como a interpretação do comportamento estrutural e hidráulico das obras deverá ser feita com vista ao controlo da segurança.

Nos planos foi considerada a redundância na medição de deslocamentos absolutos e relativos das estruturas e das fundações, dada a sua importância na auscultação do comportamento das obras. Assim, os deslocamentos planimétricos das estruturas são observados por meio de fios de prumo e por métodos geodésicos. Nestes últimos consideraram-se as metodologias tradicionais (triangulação e poligonação para a determinação de deslocamentos horizontais e nivelamentos geométricos de precisão para a obtenção de deslocamentos verticais) e, em algumas das obras, sistemas GNSS, como adiante será referido.

Quanto aos deslocamentos relativos entre blocos, a medição de movimentos de abertura/fecho de juntas é realizada com medidores de movimentos de juntas (dispositivos de resistência elétrica embebidos no betão) e através de dispositivos instalados à superfície, em regra nas galerias, que permitem monitorizar, para além dos referidos movimentos, os deslizamentos de direção montante-jusante e os verticais.

Nas barragens abóbada, para a medição direta de tensões foi considerada a instalação de um número reduzido de células tensométricas, dada a sua pequena fiabilidade. No entanto, as observações efetuadas nos grupos de extensómetros de resistência elétrica, associadas ao conhecimento das propriedades reológicas do betão proporcionado pelas células de fluência e pelos ensaios laboratoriais, permitem uma estimativa das tensões com aproximação suficiente.

No Quadro 2 apresenta-se, para cada uma das barragens, uma síntese das grandezas monitorizadas e os tipos e número de dispositivos utilizados para esse efeito. No caso dos extensómetros de resistência elétrica, as quantidades indicadas incluem os instrumentos usados nas células de fluência.

Quadro 2. Tipo e número de dispositivos/métodos de observação das cinco barragens

Grandezas	Método ou dispositivo	Barragem / Tipo estrutural e altura				
		Baixo Sabor	Feiticeiro	Ribeiradio	Ermida	Foz Tua
		Abóbada 123,00 m	Gravidade 45,00 m	Gravidade 83,00 m	Gravidade 35,00 m	Abóbada 108,00 m
Pressão hidrostática	Escalas de níveis e limnímetros	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Subpressões na fundação	Piezómetros com tomada manométrica	41	26	27	17	25
Temperatura e humidade do ar e precipitação	Estação meteorológica (termómetro, higrómetro e udómetro)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Temperaturas do betão	Termómetros de resistência elétrica	52	76	50	16	41
Pressões da água no betão	Medidores de pressão	6	-	-	-	-
Deslocamentos da estrutura (usando sistemas tradicionais)	Fios de prumo	5	3	3	2	5
	Geodesia (triangulação ou poligonais)	3 poligonais	-	Triang. por jusante	-	3 poligonais
	Geodesia (nivelamento geométrico de precisão)	5 linhas	2 linhas	1 linha	1 linha	4 linhas
Deslocamentos da fundação	Extensómetros de varas	15	8	11	14	13
Movimentos de juntas	Medidores de movimentos de juntas	152	38	78	-	98
	Bases tridimensionais	103	47	50	34	68
Extensões no betão	Extensómetros de resistência elétrica	265	45	210	-	181
Tensões no betão	Células tensométricas	10	-	-	-	12
Deformabilidade do betão	Ensaio laboratoriais	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Células de fluência	3	-	2	-	2
Acelerações sísmicas	Acelerómetros triaxiais	6	2	7	-	7
Caudais drenados e infiltrados	Drenos da fundação	215	57	116	104	87
	Bicas totalizadoras	18	4	13	10	(a definir)
Inspeções visuais	Rotina, especialidade e excepcional	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Análise das águas da albufera e drenadas	Análises físicas e químicas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Enquadramento e atividades das equipas especializadas de instrumentação (EEI)

As equipas especializadas de instrumentação (EEI), constituídas pelo LNEC para dar apoio à fiscalização neste domínio específico, tiveram também uma ligação às equipas de supervisão de obra e de projeto da EDPP. As EEI mobilizaram técnicos deslocados permanentemente nas obras, coordenados por investigadores com afetação parcial, as quais também realizaram as atividades regulamentares do LNEC no âmbito das atribuições previstas no Art.º 7º do RSB. Para salvaguardar a independência do LNEC nestas suas atribuições e definir claramente o papel das diferentes entidades envolvidas, foram elaboradas, para as obras dos três aproveitamentos, matrizes de responsabilidades que incluíram listagens exaustivas das atividades e a identificação das responsabilidades dos agentes intervenientes, nomeadamente as equipas de projeto e de coordenação das obras, a fiscalização, a EEI, o empreiteiro, a Autoridade e o LNEC, na qualidade de consultor da Autoridade.

Como referido na introdução, as EEI apreciaram os planos de instrumentação (pormenorização dos sistemas de observação com vista à sua boa concretização em obra, realizada na fase de projeto de execução), analisaram as propostas relativas a instrumentos e acessórios dos sistemas de observação, fizeram a verificação do funcionamento de dispositivos de resistência elétrica a embeber no betão estrutural, deram apoio à preparação e instalação de instrumentos de observação embebidos e aparentes, estiveram envolvidas em tarefas relacionadas com a caracterização das propriedades do betão, acompanharam trabalhos específicos de construção e tiveram a cargo a constituição e exploração das bases de dados e resultados da observação, utilizando o sistema informático dedicado em uso no LNEC e EDP.

Em complemento às atividades das EEI, o LNEC foi solicitado pelos empreiteiros para a realização de estudos específicos, de que se podem destacar os relacionados com a caracterização e avaliação do desempenho dos revestimentos dos cabos elétricos propostos para a aparelhagem embebida de observação (LNEC, 2011; LNEC, 2013) e com a verificação dimensional de “gabarits” para materialização de rosetas tridimensionais de extensómetros (Ribeiro et al, 2014).

Os trabalhos realizados pelas EEI foram documentados através de notas técnicas exaustivas, emitidas pelo LNEC, em cada uma dos aproveitamentos, com periodicidade semestral. Estes documentos constituem compilações preciosas de todos os eventos significativos ocorridos durante a construção, no que respeita às atividades de observação e controlo da segurança, sendo de uma importância crucial como elementos de base no acompanhamento do comportamento das obras nas fases de primeiro enchimento das albufeiras e de exploração.

Verificação do funcionamento dos dispositivos de resistência elétrica tipo Carlson

Os dispositivos de resistência elétrica do tipo Carlson embebidos no betão, extensómetros e medidores de movimentos de juntas, previamente verificados com o auxílio de uma prensa especialmente desenvolvida para o efeito pela EDPP, Tecnogial e LNEC (Ferreira et al, 2012), foram, nas barragens do Baixo Sabor, Feiticeiro, Ribeiradio e Foz Tua, fabricados pela empresa canadiana *RST Instruments*. Estes dispositivos têm vindo a ser utilizados regularmente em barragens de betão em Portugal e têm mostrado uma excelente robustez durante a sua instalação e envolvimento no betão, bem como grande fiabilidade nos resultados ao longo de décadas de utilização.

Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de uma montagem na prensa para a verificação de um extensómetro, com uma vista geral à esquerda e um pormenor à direita. A Figura 2 mostra um exemplo de ficha de verificação de um extensómetro de resistência elétrica tipo Carlson. Como referido, os resultados obtidos permitem verificar a linearidade da resposta do dispositivo na gama de extensões admissível e a comparação da constante obtida no ensaio com a constante fornecida pelo fabricante.

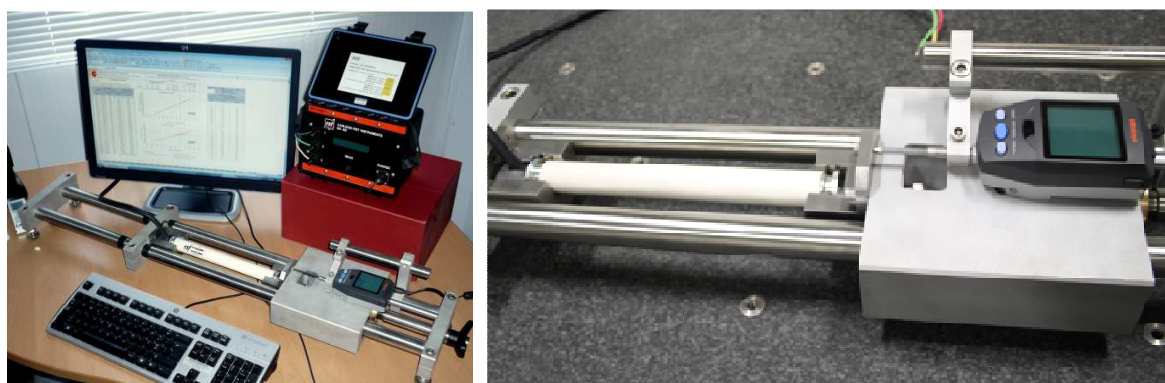


Figura 1: Aspectos da montagem na prensa para a calibração de um extensómetro de resistência elétrica tipo Carlson

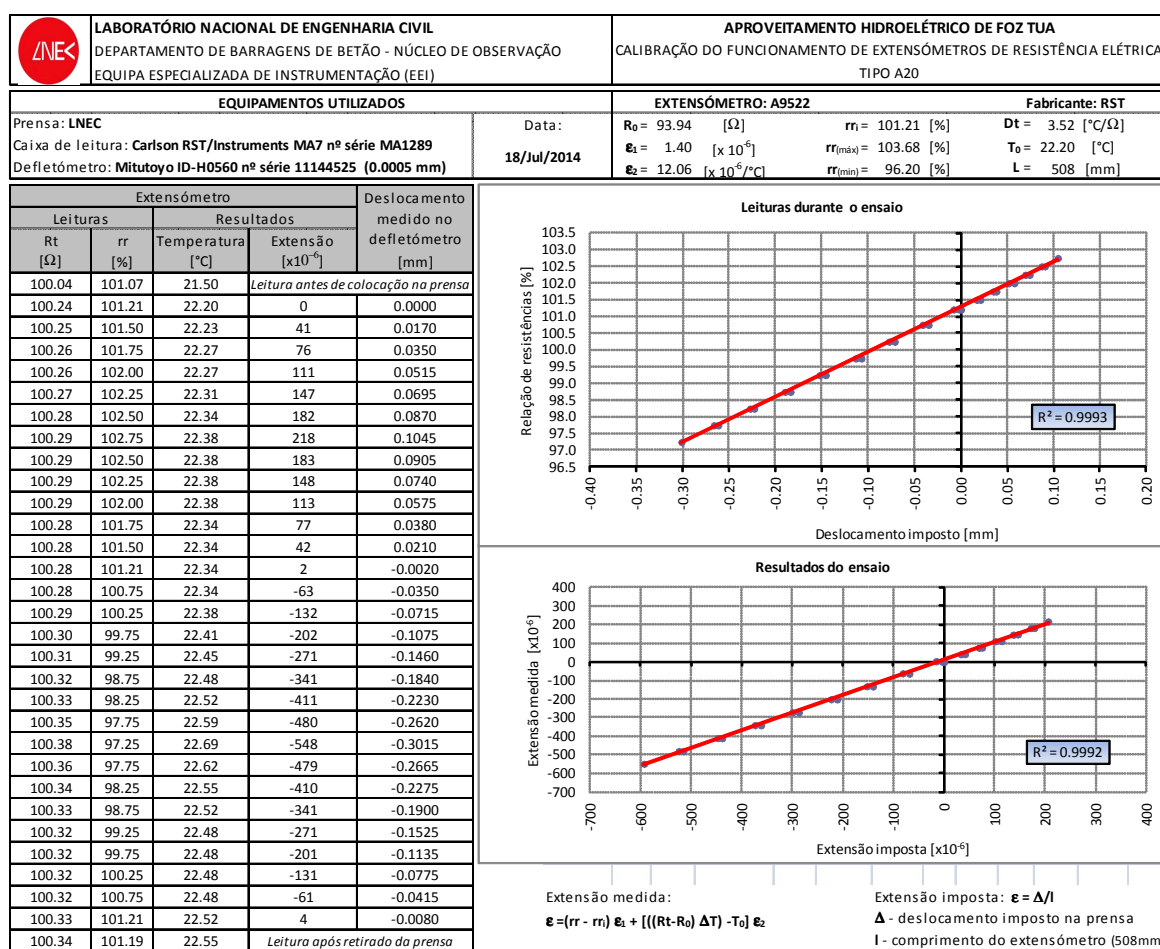


Figura 2: Ficha com os resultados da verificação do funcionamento de um extensómetro de resistência elétrica tipo Carlson da barragem de Foz Tua

No Quadro 3 e no Quadro 4 apresentam-se, respetivamente, resumos do número de extensómetros e medidores de movimentos de juntas verificados e instalados nas barragens do Baixo Sabor, Feiticeiro, Ribeiradio e Foz Tua. No conjunto das quatro barragens foram verificados 732 extensómetros e 277 medidores de movimentos de juntas. A taxa de aceitação de extensómetros de resistência elétrica foi de 96%, tendo apenas sido rejeitados 28 extensómetros. A rejeição destes extensómetros

deveu-se a fugas de óleo do seu interior e à não verificação dos critérios exigidos relativamente ao comportamento linear e reversível nos ciclos de carga e descarga. Durante a instalação em obra ocorreram três incidentes que obrigaram à substituição dos extensómetros já colocados. Apenas há a reportar cinco casos de extensómetros avariados após colocação e sem possibilidade de substituição.

Não houve rejeições nos ensaios dos medidores de movimentos de juntas. Nas barragens do Baixo Sabor e Feiticeiro não foram verificados os primeiros 89 medidores de movimentos de juntas instalados, uma vez que a prensa ainda não estava disponível no início da construção.

Quadro 3. Resumo do número de extensómetros de resistência elétrica em cada barragem

Barragem	Número de aparelhos verificados		Número de aparelhos em obra			
	Aceites	Rejeitados	Previstos no plano de observação	Perdidos durante a instalação	Substituídos durante a construção	Avariados após colocação
Baixo Sabor	267	16	265	0	2	1
Feiticeiro	46		45	0	1	3
Ribeiradio	210	10	210	0	0	0
Foz Tua	181	2	181	0	0	2
Total	704	28	701	0	3	5

Quadro 4. Resumo do número de medidores de movimentos de juntas em cada barragem

Barragem	Número de aparelhos em obra	
	Previstos no plano de observação	Rejeitados
Baixo Sabor	152 (*)	0
Feiticeiro	38 (*)	0
Ribeiradio	78	0
Foz Tua	98	0
Total	366	0

(*) Na barragem do Baixo Sabor e Feiticeiro não foram verificados os primeiros 89 medidores de movimentos de junta instalados, uma vez que a prensa ainda não estava disponível no início da construção

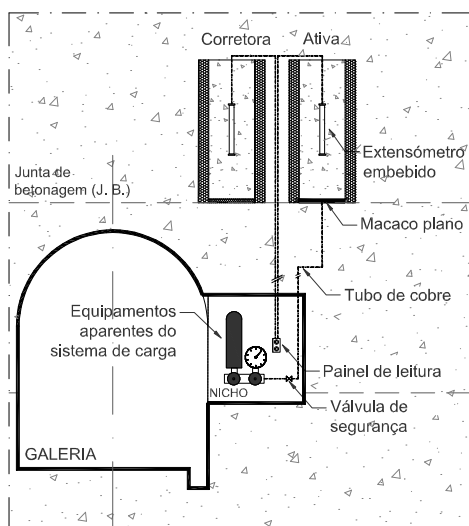
Melhoramentos no projeto e instalação de células de fluência

As células de fluência são provetes de betão embebidos no corpo das barragens para a execução de ensaios de determinação, ao longo do tempo, do módulo de elasticidade e da função de fluência, nas condições termo-higrométricas da obra.

Nas células de fluência instaladas nas barragens do Baixo Sabor e de Ribeiradio, que se localizam na terceira camada de betonagem acima de uma galeria para garantir que os provetes estão envolvidos pelo betão estrutural (Figura 3 a), foram utilizados moldes perdidos de poliestireno expandido (EPS), para, relativamente aos moldes metálicos antes usados, obviar o efeito da rigidez do molde perdido na rigidez total do provete, minimizar os custos associados à construção do molde e melhorar a transmissão de força para o provete. Manteve-se o sistema tradicional de carga associado a cada célula, que consiste num circuito fechado que regula a pressão aplicada sob a base do provete cilíndrico através de um macaco plano de aço ligado por um tubo de cobre ao sistema exterior de carga, que é acessível. A pressão é mantida constante através da regulação de óleo hidráulico e azoto no sistema. A mistura de óleo hidráulico e azoto encontra-se armazenada em pressão numa botija colocada num nicho próximo da célula. Este dispositivo permite a introdução de variações de pressão suficientemente rápidas para efetuar ensaios de módulo de elasticidade, realizar ensaios de grande

duração mantendo a pressão constante e compensar as perdas de carga devidas à fluência do betão e a eventuais pequenas fugas de óleo.

A instalação de células de fluência na barragem de Foz Tua permitiu introduzir um segundo melhoramento, este no sistema de carga. Este melhoramento consistiu na instalação das células de fluência ao nível da galeria, de forma a ser possível o acesso à base da célula e, caso seja necessário, proceder à substituição do macaco plano (Figura 4 b). Esta alteração implica a instalação de todo o sistema na mesma camada de betão, a utilização de uma tubagem flexível em detrimento da tubagem de cobre para a ligação ao macaco plano, uma redução do comprimento do cabo elétrico para leitura dos extensómetros do tipo Carlson e a construção de um nicho de maiores dimensões. A ligação aos macacos planos é feita através de um negativo em EPS, deixado durante a betonagem, que permite a ligação entre a base das células ativas e o nicho da galeria. Em termos práticos, após o endurecimento do betão e a descofragem do nicho, esse negativo é destruído, permitindo o acesso direto ao macaco plano. O acesso aos macacos planos implicou também o acesso do ar a peças que anteriormente estavam isoladas, daí que tenha sido efetuada uma proteção específica contra a corrosão das peças de aço, através de uma metalização por projeção térmica de zinco seguida de pintura. Foram instalados dois conjuntos de células de fluência, cada um com uma célula de fluência de betão integral e uma célula de fluência de betão crivado pelo peneiro com abertura de 38 mm. Na Figura 4 apresentam-se o esquema de colocação das células de fluência e o sistema de carga localizado no nicho da galeria.

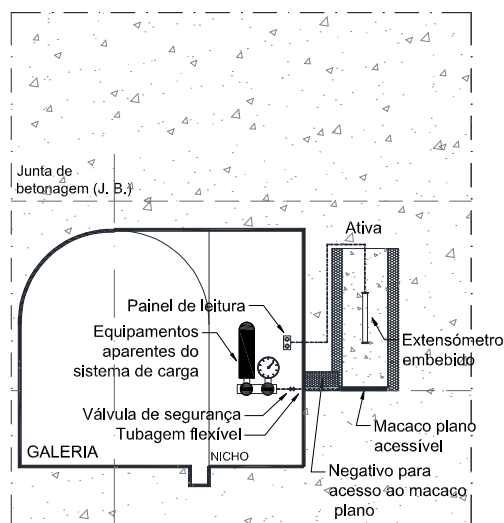


a) Esquema das células de fluência com sistema de carga não acessível



b) Vista do posicionamento dos macacos planos não acessíveis numa das células de fluência da barragem do Baixo Sabor

Figura 3: Instalação de células de fluência na barragem do Baixo Sabor (moldes de EPS e macacos planos não acessíveis)



a) Esquema das células de fluência com macacos acessíveis do sistema de carga



b) Vista dos elementos aparentes dos sistemas de carga de uma das células de fluência instaladas na barragem de Foz Tua

Figura 4: Instalação de células de fluência na barragem de Foz Tua (moldes de EPS e macacos planos acessíveis)

Sistemas de observação sísmica e de monitorização dinâmica em contínuo

De acordo com os respetivos planos de observação, as barragens do Baixo Sabor, Feiticeiro, Ribeiradio e Foz Tua estão dotadas de sistemas de observação sísmica, com o objetivo de monitorizar o comportamento dinâmico das obras quando sujeitas a ações sísmicas. Adicionalmente, nas barragens do Baixo Sabor e Foz Tua foram previstos sistemas de monitorização dinâmica em contínuo, para acompanhar o comportamento das obras quando sujeitas a excitação ambiental ou proveniente de outras fontes, designadamente a operação de comportas, através da avaliação da evolução de parâmetros dinâmicos característicos das barragens, como são as frequências próprias e os modos de vibração. Nos sistemas de observação sísmica o apoio à EDP foi feito exclusivamente pelo LNEC, ao passo que no sistema de monitorização dinâmica em contínuo já instalado na barragem do Baixo Sabor foram mobilizadas, em estreita colaboração mútua, as valências do LNEC e da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Para a observação sísmica foram instalados sistemas ativos, permanentemente funcionais, que garantem a medição e registo da ação e da resposta das estruturas aquando da ocorrência de sismos, através de um conjunto de estações compostas por acelerómetro triaxiais, dotadas de meios de digitalização e transmissão de dados para uma unidade central, que efetua a gestão da rede de estações e a consequente análise e processamento da informação captada logo que seja ultrapassado um nível de aceleração pré-estabelecido (Quadro 5).

No Quadro 6 indica-se o número de acelerómetros de elevada resolução previstos nos sistemas de observação dinâmica em contínuo das barragens do Baixo Sabor e Foz Tua. Estes sistemas também são dotados de uma unidade central de gestão da rede de acelerómetros e a análise e processamento de registos.

Nas barragens do Baixo Sabor e de Foz Tua foi ainda realizada a caracterização do comportamento dinâmico através de ensaios de vibração forçada, para as situações de albufeira vazia e cheia (neste caso ainda só efetuada para a barragem do Baixo Sabor), por forma a conhecerem-se os padrões de comportamento para situações de referência, que serão muito úteis na balizagem das respostas observadas com os sistemas de monitorização dinâmica em contínuo e nas atividades subsequentes de observação e controlo de segurança das obras.

Quadro 5. Número de acelerómetros triaxiais instalados nos sistemas de observação sísmica

Barragem	Número de acelerómetros triaxiais		
	Galerias superiores e consola central	Galeria geral de drenagem (junto à fundação)	Rede exterior na vizinhança da albufeira
Baixo Sabor	3	3	6
Feiticeiro	1	1	
Ribeiradio	4	3	-
Foz Tua	4	3	4

Quadro 6. Número de acelerómetros de elevada resolução instalados nos sistemas de observação dinâmica em contínuo

Barragem	Número de acelerómetros nas galerias superiores e consola central
Baixo Sabor	20
Foz Tua	12

Sistemas GNSS para monitorização contínua de deslocamentos

Após a instalação de um sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) na barragem do Cabril, realizada no âmbito de um projeto de investigação financiado pelo Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com o objetivo de permitir a medição em contínuo de deslocamentos da barragem, foi decidida a instalação de sistemas do mesmo tipo nas barragens do Baixo Sabor, Feiticeiro e Foz Tua.

Os equipamentos instalados consistem em antenas GNSS de alta precisão e respetivos recetores. As configurações instaladas têm todas uma antena de referência fora da zona de influência das obras e uma (Cabril e Foz Tua) ou três (Baixo Sabor e Feiticeiro) antenas nas próprias barragens (Figura 5). Os equipamentos GNSS permitem obter dados, em tempo real, com uma frequência de amostragem entre 20 e 100 Hz, para a determinação de posições dos pontos do coroamento das barragens onde estão instalados, com a frequência desejada. As soluções úteis para este tipo de obras são as de posição horária e diária, que permitem a determinação de deslocamentos tridimensionais com a mesma frequência e com precisões milimétricas.



Figura 5: Localização das quatro antenas GNSS na barragem do Feiticeiro

Considerações finais

A partilha de responsabilidades entre a EDPP e o LNEC na execução dos trabalhos referentes à instrumentação das recentes barragens de betão, que se concretizou através do apoio desta última entidade às equipas de projeto, coordenação de obra e fiscalização no âmbito da implementação dos planos de observação, durante a construção das cinco barragens integradas nos aproveitamentos hidroelétricos do Baixo Sabor, Ribeiradio-Ermida e Foz Tua, que decorreu entre março de 2011 e abril de 2016, revelou-se muito vantajoso para as duas partes. De facto, a EDPP teve um apoio especializado num domínio muito específico, onde a experiência do meio empresarial nacional é escassa, que permitiu, adicionalmente, a formação de técnicos do dono de obra, dos empreiteiros e das fiscalizações, para além de possibilitar uma transmissão mais adequada de conhecimentos entre diferentes gerações no LNEC e na própria EDPP.

A abordagem seguida permitiu o estabelecimento e agilização de uma cadeia coerente de decisões e tarefas executivas entre os diferentes agentes envolvidos na instalação dos sistemas de observação das obras, tendo-se obtido elevados níveis de desempenho nestes trabalhos, de que são exemplo as baixíssimas percentagens de instrumentos embebidos no betão que estão avariados.

Agradecimentos

Os trabalhos de gabinete e de campo relativos às atividades descritas foram realizados por um grande número de engenheiros e técnicos da EDPP e do LNEC, em estreita interação com os empreiteiros das obras. A todos eles se deve, acima de tudo, o sucesso da implementação dos planos de observação das barragens, em geral, e a obtenção de elevados níveis de desempenho na instalação dos dispositivos de monitorização, em particular.

Referências bibliográficas

- FERREIRA, J.I.; GONÇOLVES, M.; ALMEIDA, R.; SILVA, M.; BATISTA, A. L.; RIBEIRO, A.; SERRA, C., 2012 - **Desenvolvimento de uma prensa para a verificação de dispositivos de resistência elétrica tipo Carlson a embeber no betão de barragens**. In Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Porto: FEUP.
- LNEC, 2011 – **Barragens do Baixo Sabor. Caracterização dos materiais do revestimento dos cabos elétricos propostos para a aparelhagem embebida de observação**. Relatório LNEC 378/2011 - DM/NMO, Lisboa.
- LNEC, 2013 – **Avaliação das características e do desempenho do revestimento exterior, de natureza polimérica, de um cabo elétrico proposto para a aparelhagem embebida de observação de barragens de betão**. Relatório LNEC 135/2013 - DM/NMO, Lisboa.
- NOIB, 1993 - **Normas de observação e inspeção de barragens**. Anexo à Portaria nº 847/93, Lisboa.
- RIBEIRO, A.; LAGES MARTINS, L.; TAVARES DE CASTRO, A.; SERRA, C., 2014 - **Caracterização metrológica de rosetas para instalação de grupos tridimensionais de extensómetros do tipo Carlson em barragens**. In Conferência Nacional ConfMet 2014, Lisboa: LNEC.
- RSB, 2007 - **Regulamento de segurança de barragens**. Decreto-Lei nº 344/2007, Lisboa.
- SERRA, C.; BATISTA, A.L., 2016 - **Experiência de utilização de uma prensa na verificação do funcionamento de dispositivos de resistência elétrica tipo Carlson para a monitorização de barragens de betão**. In 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental - CNME-2016, Lisboa: LNEC.
- SERRA, C.; BATISTA, A.L.; MONTEIRO DE AZEVEDO, N., 2016 - **Melhoramentos recentes no projeto e instalação de células de fluência em barragens de betão**. In 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental - CNME-2016, Lisboa: LNEC.