

Monitorização experimental da Nova Barragem do Alto Ceira usando a tecnologia da fibra ótica

**Joaquim Figueiras¹, Carlos Rodrigues², Rémy Faria²
A. Tavares de Castro³
Ricardo Pimentel⁴, D. Silva Matos⁴**

RESUMO

A Nova Barragem do Alto Ceira, atualmente em construção, é uma barragem abóbada, em betão, com 41m de altura e 133m de comprimento no coroamento, situada na zona centro de Portugal. A necessidade de construção da nova barragem prende-se com a substituição da existente, situada cerca de 200m a montante, a qual se encontra significativamente degradada devido a fenómenos de expansão do betão. Como é usual, o projeto da nova barragem engloba um plano de observação elaborado de acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens, sendo a instrumentação embebida no betão baseada em sensores elétricos convencionais, em utilização há várias décadas.

Os recentes desenvolvimentos da monitorização estrutural com base na fibra ótica, beneficiando não só da elevada precisão, durabilidade, e possibilidade de multiplexagem dos sensores óticos, mas também da facilidade de transmissão do sinal e comunicação da fibra ótica, evidenciam grandes potencialidades na sua aplicação a barragens. Com esse objetivo, novos transdutores em fibra ótica foram desenvolvidos e instalados, numa base experimental, na Nova Barragem do Alto Ceira. Tendo em consideração que os sensores embebidos no betão em massa são dos mais expostos à agressividade dos métodos construtivos de barragens, foram selecionados para implementação novos transdutores de deformação, de temperatura e de juntas, baseados nas redes de Bragg em fibra ótica, com o objetivo de avaliar o seu desempenho, fiabilidade e requisitos de instalação. Assim, de um modo pioneiro, foram concebidos e construídos em laboratório, e instalados em obra um número limitado destes sensores. Neste artigo, são apresentados os novos sensores e as condições de instalação na barragem, bem como resultados da calibração e de comparação com os sensores elétricos tradicionais, quer em condições controladas de laboratório, quer em condições de obra.

Palavras-chave: Barragens de betão; monitorização experimental; sensores embebidos; fibra ótica

1. INTRODUÇÃO

As barragens constituem um tipo especial de obras que requer um grande investimento financeiro e cujo eventual colapso pode acarretar a perda de vidas humanas e enormes prejuízos materiais e ambientais. A instrumentação, a observação e a interpretação do comportamento das barragens constituíram desde sempre um instrumento técnico imprescindível para melhor controlar os riscos associados à exploração deste tipo de infraestruturas.

¹ LABEST, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, jafig@fe.up.pt

² NewMENSUS, Lda, Rua Actor Ferreira da Silva, 100, Porto, carlos.rodrigues@newmensus.pt / remy.faria@newmensus.pt

³ DBB/NO, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, tcastro@lnec.pt

⁴ EDP, Gestão de Produção de Energia S.A., Portugal, ricardo.pimentel@edp.pt / domingossilva.matos@edp.pt

Muita da instrumentação ainda hoje utilizada na observação de estruturas (tecnologia das cordas vibrantes, da resistência elétrica, etc.) foi desenvolvida em meados do século passado devido à necessidade da sua aplicação em barragens. Com o decorrer dos anos tem havido avanços na automatização da aquisição do sinal elétrico, mas os sensores utilizados têm-se mantido com pequenas alterações. O advento da tecnologia de monitorização com base em sensores de fibra ótica, apresentando elevada estabilidade de sinal e reduzindo a cablagem necessária com recurso à multiplexagem dos sensores [1-4], por um lado, e a estagnação no desenvolvimento dos sensores elétricos tradicionais (alguns hoje com fornecedor único) a par do aumento exponencial do custo das cablagens de cobre necessárias à instrumentação elétrica, por outro lado, criam as condições para uma mudança de paradigma na instrumentação de barragens de betão.

Reveste-se assim de grande interesse e atualidade o desenvolvimento de soluções de monitorização baseadas na tecnologia das fibras óticas, para a aplicação específica a barragens, nomeadamente a barragens de betão. Embora em Portugal não haja ainda a aplicação de sensores de fibra ótica na observação de barragens, aplicações experimentais desta tecnologia têm sido reportadas com sucesso em vários congressos internacionais da especialidade.

Tirando partido da experiência já adquirida pelo LABEST no desenvolvimento e aplicação desta tecnologia a pontes [5, 6], pretende-se implementar novos transdutores (temperatura, deformação e deslocamento) com características melhoradas de robustez, fiabilidade e durabilidade, essenciais para a aplicação em barragens. As questões relacionadas com a economia e robustez das cablagens embebidas no betão serão tratadas de modo a mitigar os constrangimentos que a instrumentação coloca ao processo construtivo da obra.

Assim, é objeto deste artigo apresentar o desenvolvimento de um sistema de observação experimental, baseado na tecnologia das fibras óticas, para medir deformações, temperaturas e aberturas de juntas no interior do betão de barragens [7]. Após a calibração dos novos transdutores em laboratório, foi efectuada a sua instalação na Nova Barragem do Alto Ceira (NBAC) [8, 9], em construção, sendo os resultados obtidos comparados com os da instrumentação elétrica tradicional [10].

2. NOVOS TRANSDUTORES DE FIBRA ÓTICA

De entre as várias técnicas de utilização das fibras óticas na medição de parâmetros relevantes em estruturas de engenharia [11], aquela que tem alcançado maior sucesso corresponde às redes de Bragg em fibra ótica (FBG) considerando o seu desempenho metrológico, em especial no que se refere à deformação e à temperatura. Os sensores FBG baseiam-se em alterações periódicas do índice de refração de um comprimento limitado (5 a 10mm) do núcleo da fibra ótica. Esta modulação periódica atua como um espelho seletivo para o comprimento de onda de luz, que satisfaz à condição de Bragg, deixando passar todos os outros comprimentos de onda através da rede sem qualquer interferência [2]. O excelente desempenho dos sensores FBG resulta da elevada sensibilidade do comprimento de luz refletido às variações de deformação e de temperatura.

Para a aplicação prática dos sensores FBG em obras de engenharia é necessário o desenvolvimento de transdutores com características adequadas. O objetivo primordial destes transdutores consiste em transformar, com o máximo de precisão e fiabilidade, um dado parâmetro físico a ser medido num sinal ótico tal como o comprimento de onda associado ao FBG. Além disso, os aspetos relacionados com a durabilidade, facilidade de instalação, robustez, e integração em rede das aplicações específicas em obra são também atributos essenciais a considerar na conceção dos transdutores.

2.1 Deformação do betão

Tendo em consideração a especificidade exibida pelo betão de barragens, um novo transdutor de deformação de embeber no betão foi desenvolvido, aliando as características de simplicidade, robustez, precisão e durabilidade. O objetivo do novo transdutor é medir a deformação média do betão em

massa sobre um dado comprimento de referência. Esta deformação média deve ser representativa da deformação local da estrutura, homogeneizando os efeitos pontuais dos agregados do betão e outras pequenas descontinuidades. A facilidade de instalação do transdutor durante a fase de construção e a sua resistência ao processo de betonagem, que exige uma robustez adequada, são também aspetos importantes na conceção do transdutor. A geometria do transdutor de deformação desenvolvido para aplicação na NBAC está ilustrada na Fig. 1. Foi definido um comprimento de referência de 350mm, correspondendo a 5 vezes a máxima dimensão do agregado utilizado, que é de 70mm na presente obra. O transdutor é constituído por um varão liso de aço inox, de classe e diâmetro selecionados, com duas ancoragens (discos em aço inox) distando do comprimento de referência. Um sensor FBG alinhado com o varão é devidamente colado na zona central para medição da deformação representativa do varão, sendo esta zona central protegida contra as ações mecânicas resultantes da betonagem.



Figura 1. Ilustração do transdutor de deformação em fibra ótica de embeber no betão.

Foram executados testes laboratoriais para avaliação e calibração do comportamento do transdutor. Realizaram-se testes de tração uniaxial para avaliar a resposta do transdutor em termos de sensibilidade à deformação e obter a consequente calibração. O novo transdutor foi também submetido a ciclos térmicos, de 5 a 45°C com escalões de 5°C, numa câmara climática, para avaliar a eficiência da colagem e a sua resposta e estabilidade sob variações de temperatura. A compensação dos efeitos de temperatura no transdutor é essencial para obter a componente da deformação mecânica do betão. Este efeito é particularmente importante, quer na fase inicial de hidratação do betão, quer em aplicações a longo prazo envolvendo, em geral, variações significativas de temperatura com forte impacto no sinal dos sensores. A compensação da temperatura sobre o transdutor pode ser efetuada em regime linear por meio da medição local da temperatura.

Para comparar o desempenho dos novos transdutores de deformação em fibra ótica com os tradicionais transdutores elétricos usados em barragens (extensómetros de resistência elétrica tipo Carlson) foi também instrumentado em laboratório um prisma de betão que foi sujeito a testes cíclicos de compressão uniaxial sob condições controladas. O prisma de betão, de 250x250mm² de secção e 700mm de comprimento, foi instrumentado internamente com 2 transdutores óticos, 1 extensómetro Carlson e 1 extensómetro de cordas vibrantes (ver Fig. 2 a)). Para referência, o prisma foi ainda instrumentado externamente na zona central das faces com 4 cliques com 300mm de base de medida. O prisma foi então submetido a cinco ciclos sinusoidais de carga/descarga em prensa servo comandada de alta precisão (ver Fig. 2 b)).

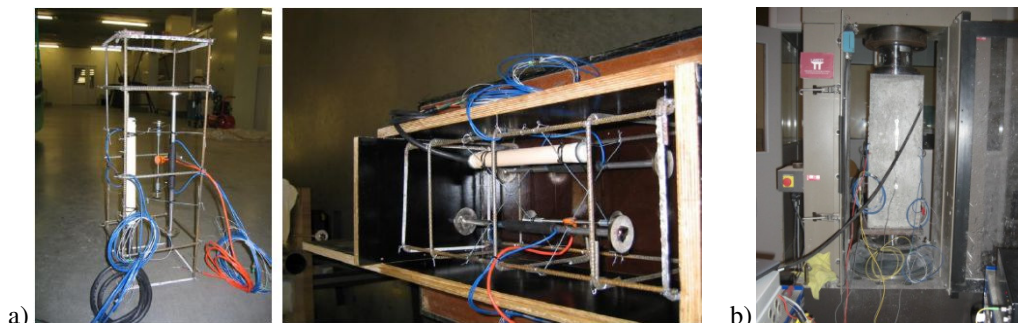


Figura 2. Ensaio de laboratório para verificação do desempenho dos transdutores de deformação: instrumentação interna do prisma de betão, a); ensaio do prisma sob ciclos de compressão, b).

A evolução da deformação durante o ensaio está representada na Fig. 3 a) comparando o desempenho dos diferentes equipamentos com a média da deformação lida nos 4 cliques instalados externamente. Os desvios observados, considerando as calibrações de base, são sempre inferiores a 1% comparando os resultados dos diferentes transdutores na medição das deformações do betão sob ciclos de compressão.

Na Fig. 3b) está ilustrada a relação observada entre a média dos cliques (referência) e um dos transdutores óticos de embeber.

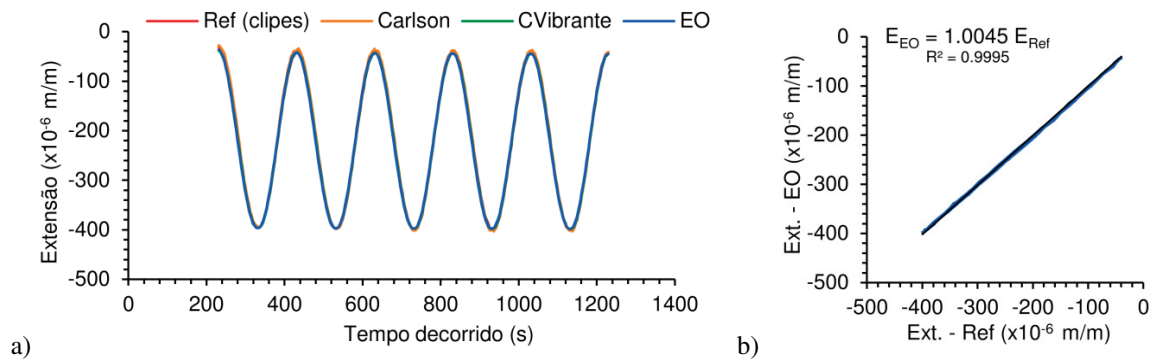


Figura 3. Ensaio do prisma sob ciclos sinusoidais de compressão: valores dos diferentes transdutores, a); correlação entre a deformação de referência (clipes externos) e a deformação medida com o novo transdutor ótico, b).

2.2 Movimento de juntas

O transdutor de abertura de juntas desenvolvido assenta num princípio de funcionamento idêntico ao transdutor de deformação apresentado no ponto anterior. É constituído por um corpo em aço especial, de elevada capacidade de deformação elástica, munido de ancoragens por mini-cunhas nas extremidades, e instrumentado na zona central com sensores FBG pontuais. Na Fig. 4 ilustra-se o corpo do transdutor de abertura de juntas durante um ensaio de tração, podendo-se observar também na Fig. 8 b) o transdutor aplicado em obra.



Figura 4. Ilustração esquemática do transdutor de abertura de juntas durante um ensaio de tração.

Neste transdutor, a aderência entre o corpo longitudinal e o betão envolvente é eliminada por completo interpondo uma película de borracha não aderente. As cabeças de ancoragem são as responsáveis pela transmissão da abertura de junta ao corpo do transdutor, estando afastadas entre si de 1000mm para comportar uma abertura máxima de junta especificada de 15mm. A configuração descrita permite que o sensor de Bragg (FBG) instalado na secção central do transdutor meça com representatividade a deformação média instalada ao longo de todo o corpo do transdutor. A deformação média integrada no comprimento de referência permite calcular o deslocamento relativo entre as cabeças de ancoragem que corresponde à abertura da junta. Na instalação, uma das cabeças é ancorada ao bloco de betão existente, sendo a outra extremidade disposta de forma a ser envolvida pela betonagem do bloco adjacente.

Este novo transdutor foi igualmente sujeito a um conjunto de testes laboratoriais para verificar o seu desempenho. Foram realizados testes de tração uniaxial para calibração do transdutor e verificação do campo de deformação máxima. Testes de arrancamento permitiram validar a transferência eficiente da força de ancoragem ao betão, e os ensaios sob ciclos térmicos certificaram o comportamento do transdutor às variações de temperatura.

2.3 Temperatura

Os transdutores de temperatura desenvolvidos assentam na medição da extensão numa consola em aço inox isenta de extensões mecânicas. A conceção do termómetro inclui então um elemento interno de aço isolado mecanicamente de toda a envolvente e munido de um sensor de Bragg, como se ilustra na Fig. 5. Esta configuração permite encastrar uma das extremidades do varão de aço no corpo externo e manter livre a outra extremidade do corpo interno onde é aplicado o sensor FBG para medição da temperatura.

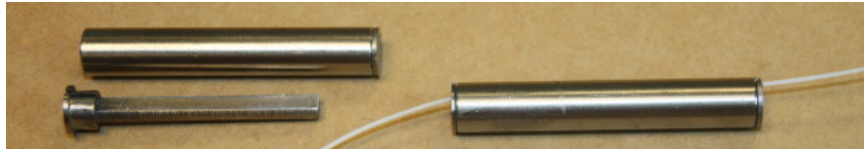


Figura 5. Ilustração do transdutor ótico de temperatura.

Tendo em consideração a resposta padrão e linear do aço inox às variações de temperatura, as deformações medidas pelo sensor FBG podem ser diretamente relacionadas com o valor da temperatura. Testes laboratoriais permitiram calibrar a sensibilidade efetiva à temperatura de cada transdutor. Devido à possibilidade dos sensores de Bragg poderem ser multiplexados em comprimento de onda, e atendendo à possibilidade de fabrico dos sensores com diferentes comprimentos de onda, podem ser instalados 10 ou mais transdutores de temperatura ao longo de uma mesma fibra ótica, com afastamento entre os transdutores configurado para as necessidades efetivas de obra.

3. INSTALAÇÃO EM OBRA

Como já referido, para além da aparelhagem prevista no Plano de Observação da Nova Barragem do Alto Ceira [12,13], englobando sensores elétricos tradicionais, foi aplicado um conjunto de aparelhos de observação baseado na tecnologia das fibras óticas em zonas seleccionadas da obra. Os transdutores desenvolvidos foram instalados para medir as deformações do betão, a abertura de juntas entre blocos e as variações de temperatura no betão, a meia altura da zona central do corpo da barragem. Duas zonas diferentes da barragem foram seleccionadas compreendendo os blocos de betonagem B4 e B5 na região central à cota 646.0, para instalação dos transdutores em fibra ótica, como ilustra a Fig. 6.

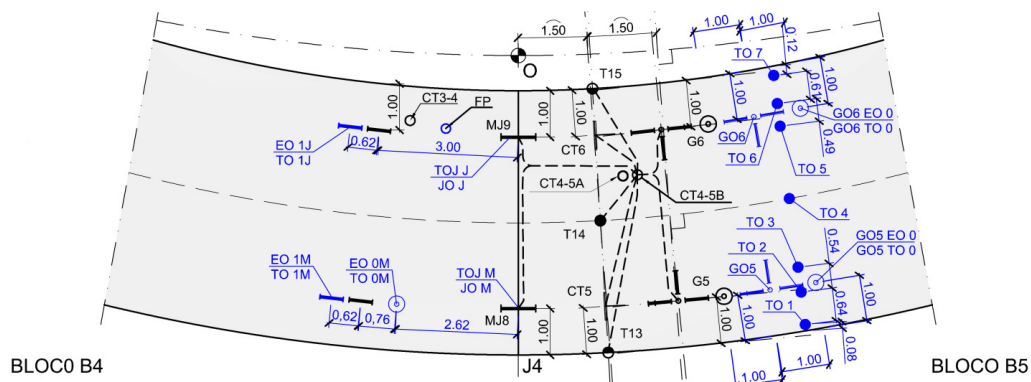


Figura 6 - Localização dos transdutores de fibra ótica instalados e respetiva nomenclatura

Numa das zonas (bloco B5), foram instalados a 1m de cada um dos paramentos da abóbada dois grupos de 5 transdutores de deformação, um a montante GO5 (grupo ótico 5) e outro a jusante GO6 (grupo ótico 6). Estes dois grupos estão em correspondência com a posição de dois grupos alternativos de extensómetros convencionais (G5 e G6). A Fig. 7 a) apresenta uma vista geral da localização dos transdutores durante a instalação, e a Fig. 7 b) ilustra a fixação e o arranjo espacial de um dos grupos de transdutores óticos de deformação aplicados. Este arranjo permite determinar o estado de tensão num plano paralelo ao paramento.

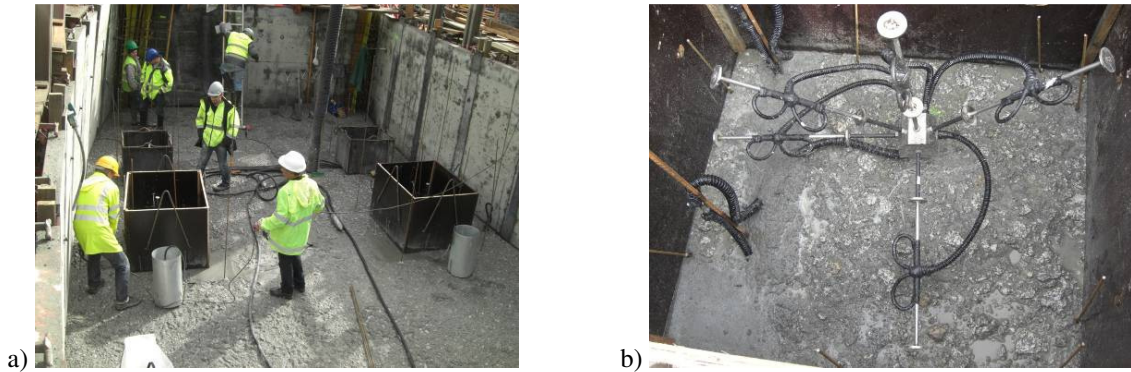


Figura 7 - Vista geral dos grupos de extensómetros instalados no bloco B5 a); e configuração dos cinco transdutores óticos de um dos grupos, b).

Complementarmente, no bloco adjacente (B4), foram instalados dois pares (montante e jusante) de transdutores de deformação a 1m dos paramentos da barragem, que permitem de igual modo uma comparação direta das deformações registados pelos extensómetros de Carlson tradicionais e pelos novos transdutores em fibra ótica (ver Fig. 8 a)). Para permitir efetuar a compensação das deformações não dependentes da tensão (retração e temperatura) foram também instalados transdutores de deformação em fibra ótica em baldes compensadores de parede dupla, colocados juntos dos grupos (ver Fig. 7 a), e do par de extensómetros de montante (ver Fig. 8 a).

Foram instalados dois transdutores em fibra ótica para medição de movimentos de abertura e fecho da junta de contração que separa os blocos B4 e B5, a cerca de 1m das faces de montante e de jusante respetivamente (ver Fig. 6). Na Fig. 8 b) pode observar-se um transdutor de junta em fibra ótica posicionado para ser envolvido pelo betão da nova fase e com umas das extremidades já ancorada ao bloco adjacente. Um medidor de movimentos de junta convencional (tipo Carlson) está colocado próximo do novo transdutor para comparação de resultados.

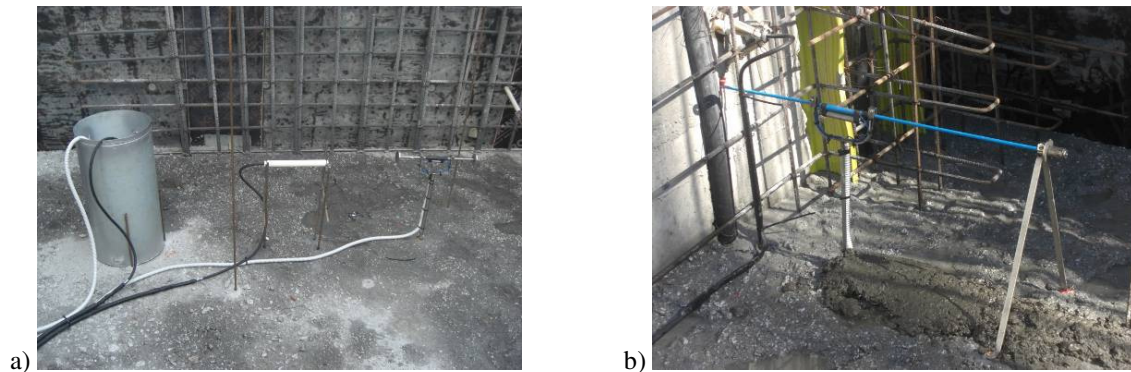


Figura 8. Balde com extensómetros compensadores e par de diferentes extensómetros instalados lado a lado, a); detalhe da instalação de um transdutor de juntas, b).

Um *array* de 7 termómetros óticos (TO1 a TO7, ver Fig. 6) foi instalado no bloco B5 para medir o perfil de temperaturas ao longo da espessura da barragem à cota 646.0. Este conjunto de sensores está implementado numa única fibra que está protegida por um tubo corrugado flexível. Os termómetros estão posicionados a meia espessura da barragem (TO4) e a cerca de 0.10m, 0.70m e 1.20m afastados de cada um dos paramentos. Um segundo conjunto de sensores de temperatura foi acoplado a alguns dos transdutores para permitir uma compensação mais eficaz dos efeitos térmicos.

Na Fig. 9 ilustra-se um conjunto de detalhes de cenários da instalação do sistema de monitorização. Está patente a diferença em termos de complexidade e de economia no que se refere à condução de cablagens em obras (Fig. 9 a)). O sinal de um número similar de transdutores é transmitido por três fibras óticas, encapsuladas num tubo corrugado, em vez dos 16 cabos elétricos instalados. Os trabalhos de betonagem juntos aos sensores são ilustrados na Fig. 9 b), sendo importante referir que apesar das condições agressivas todos os sensores instalados ficaram em perfeitas condições de funcionamento

após a betonagem. A Fig. 9 c) ilustra o posto de observação do sistema ótico constituído por uma unidade UPS, um PC compacto e uma unidade Bragg Meter de 8 canais (Fibersensing FS2200).



Figura 9. Detalhes da instalação em obra: contraste entre conjunto de cabos elétricos e a simples conduta ótica, a); betonagem junto aos sensores, b); posto de aquisição do sinal ótico, c).

4.RESULTADOS

Nesta secção são apresentados e sumariamente discutidos alguns dos resultados obtidos com o sistema experimental de monitorização baseado nos novos transdutores de fibra ótica embebidos no betão. É apresentada a evolução das temperaturas ao longo de um perfil transversal e a variação de deformações no betão num dos grupos de extensómetros ao longo de um período de cerca de 7 meses. Deve ser referido que embora a betonagem do bloco B5 à cota 646.0 tenha ocorrido a 4 de novembro de 2011, a unidade de interrogação do sinal ótico apenas ficou operacional a 26 de novembro de 2011. São apresentados ainda os resultados obtidos com os transdutores de juntas instalados a 29 de março de 2012, aquando da betonagem do bloco B4 à cota 646.0.

4.1 Temperaturas

Os resultados obtidos com o *array* de temperaturas, compreendendo os sete pontos de medida através da espessura, estão ilustrados na Fig. 10. Como já referido, o início das leituras verificou-se a 26 de novembro, cerca de 20 dias após a betonagem, notando-se ainda nos primeiros meses a dissipação do calor de hidratação do betão. A aquisição dos dados é efetuada de modo automático, em contínuo, com um intervalo pré-programado. Os períodos de interrupção de registos observados no gráfico correspondem a quebras no fornecimento de energia. Da observação da Fig. 10, nota-se claramente as variações diárias de temperatura nos termómetros colocados mais à face (TO.1 e TO.7), especialmente naquele colocado junto à face jusante (TO.7), orientada para SW, com exposição solar mais intensa.

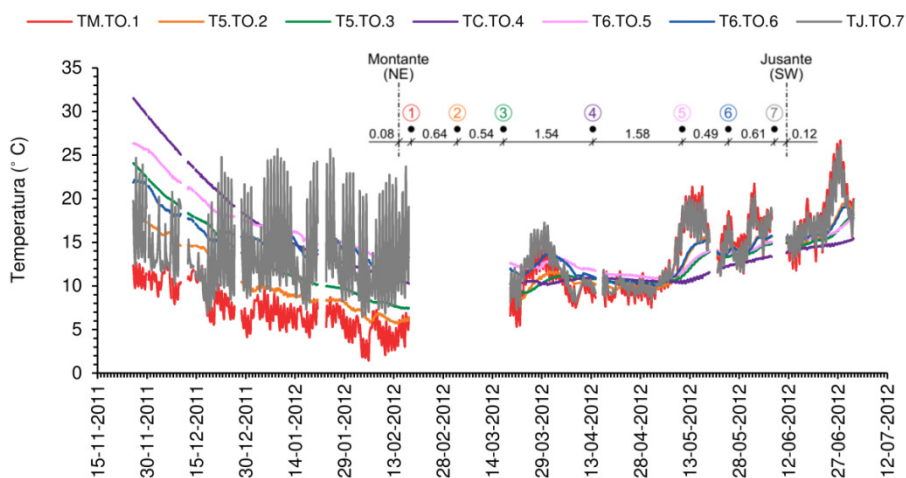


Figura 10. Perfil de temperaturas medido com 7 termómetros de fibra ótica dispostos na espessura da barragem.

4.2 Deformações do betão

A Fig.11 ilustra a evolução das deformações no betão medidas com os transdutores óticos do grupo 5 (GO5) e pelo correspondente compensador (G5.EO.0), ao longo de um período de cerca de 7 meses. Está ainda representada no gráfico a temperatura dada pelo termómetro acoplado ao extensómetro compensador (G5.TO.0). Este período é o correspondente às temperaturas exibidas na Fig. 10, estando os termómetros TO.2 e TO.3 próximos deste grupo de extensómetros. A Fig. 12 compara os resultados das deformações do betão obtidas com 3 dos transdutores do grupo G5 (EO.1, EO.3 e EO.0) com os correspondentes resultados dos extensómetros de Carlson convencionais. Esta comparação mostra-se muito satisfatória, incrementando a confiança na aplicação prática dos novos transdutores.

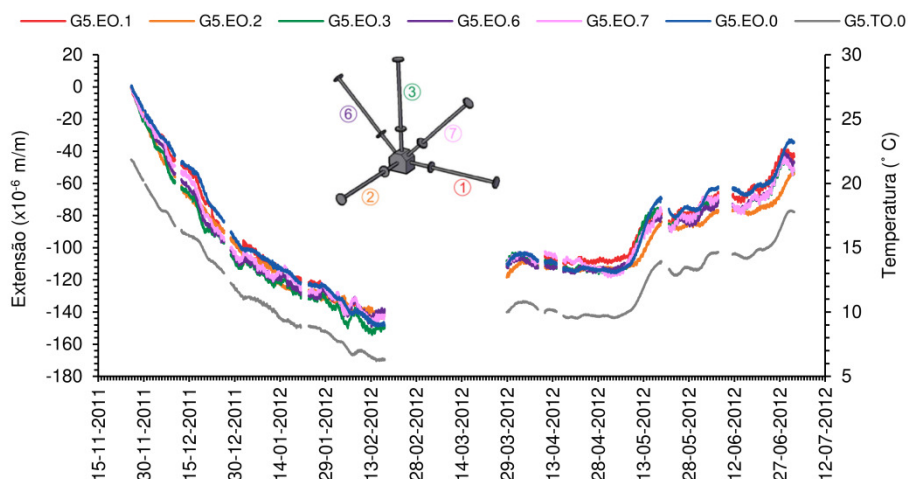


Figura 11. Deformações do betão fornecidas pelos transdutores do grupo G5 e temperaturas medida no provete compensador.

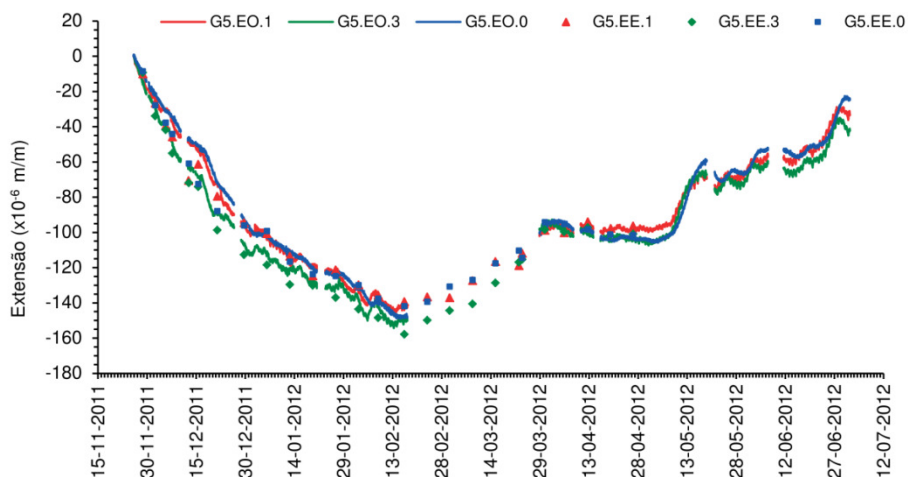


Figura 12. Comparação das deformações do betão fornecidas pelos novos transdutores (EO) e pelos extensómetros convencionais (EE).

As deformações constantes dos gráficos correspondem ao estado de deformação total do betão que inclui a componente térmica livre, a de retração e a mecânica. Uma forma alternativa de análise e validação das deformações obtidas com um dado grupo de extensómetros consiste em obter o primeiro invariante das deformações (neste caso no plano) somando o valor das duas deformações obtidas segundo um sistema ortogonal de eixos, seja 1 e 3, e 6 e 7 com referência ao grupo esquematicamente representado na Fig. 11. Assim, a Fig. 13 ilustra o invariante de deformação obtido com os transdutores óticos 1 e 3, e 6 e 7 do grupo G5, cuja diferença teoricamente deveria ser nula. Na mesma figura ilustra-se ainda os correspondentes valores do invariante de deformação fornecidos pelos

extensómetros tipo Carlson, para efeito de comparação. Mais uma vez se verifica que os resultados dos dois sistemas de monitorização são muito concordantes.

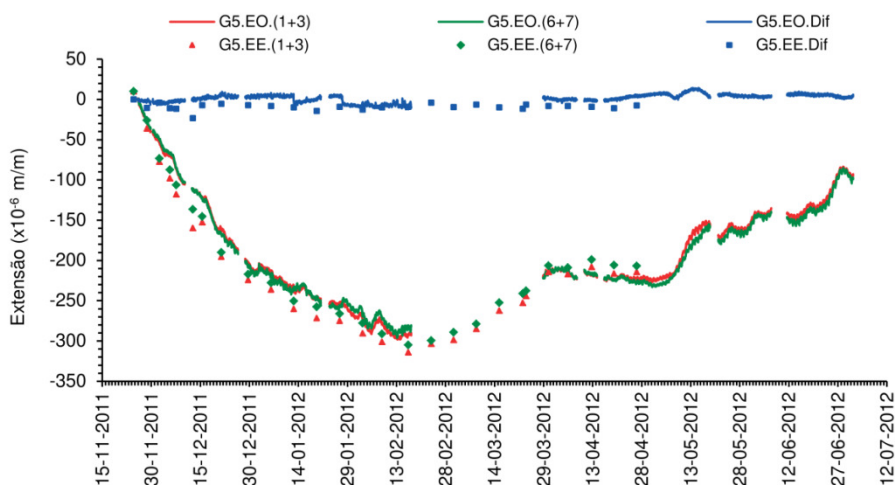


Figura 13. Comparação do invariante de deformação obtido com o grupo de extensómetros óticos (EO) e elétrico (EE) na posição G5.

4.3 Abertura de juntas

Os deslocamentos correspondentes à abertura da junta entre os blocos B4 e B5 à cota 646.0 estão ilustrados na Fig. 14 para os dois transdutores óticos colocados a montante e a jusante, a cerca de 1m do paramento respetivo. Os resultados apresentados iniciaram-se com a instalação dos transdutores e prolongam-se por um período de cerca de 4 meses. Para efeito de comparação estão ainda representados no gráfico os valores correspondentes da abertura de junta fornecidos pelos medidores de juntas convencionais.

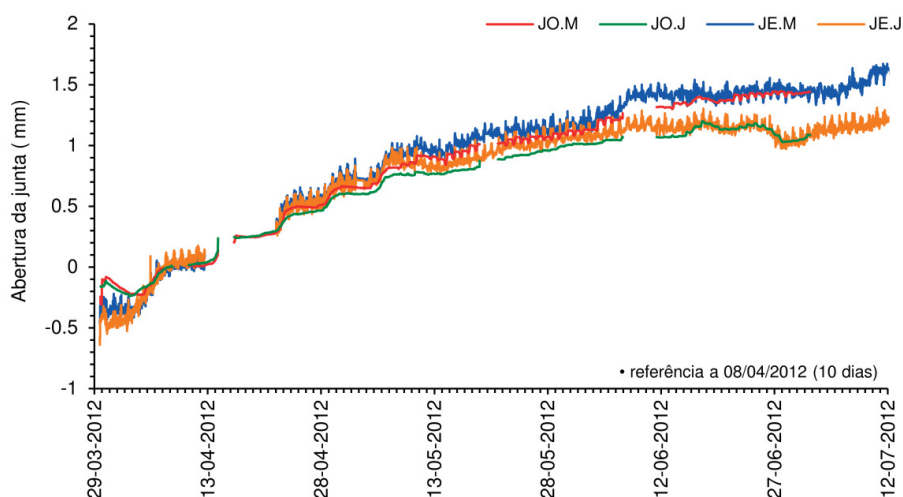


Figura 14. Comparação da abertura de juntas (B4/B5), fornecida pelos sensores óticos (JO) e pelos sensores elétricos (JE) junto às faces de montante e jusante.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentado o desenvolvimento e a implementação de transdutores baseados em sensores de rede de Bragg em fibra ótica (FGB) para a medição de deformações, movimentos de juntas e temperaturas no interior da massa de betão em barragens. Os transdutores, depois de testados e calibrados em laboratório, foram instalados na Nova Barragem do Alto Ceira no âmbito de um

programa de inovação e desenvolvimento tecnológico, sendo os resultados alcançados até ao momento muito promissores.

O objetivo principal deste trabalho consiste na exploração e validação de novas alternativas, baseadas na tecnologia das fibras óticas, para a instrumentação de barragens que sejam competitivas com as técnicas tradicionais de observação apoiadas em sensores elétricos. Adicionalmente ao desenvolvimento e avaliação da fiabilidade dos transdutores óticos de embeter no betão apresentados, perspetiva-se o desenvolvimento de novos transdutores para a medição de outros parâmetros importantes na observação de barragens como sejam deslocamentos, rotações, subpressões, deformações da fundação e caudais infiltrados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às entidades envolvidas neste projeto e aos respetivos colaboradores que tornaram possível a instalação experimental de transdutores de fibra ótica na NBAC, nomeadamente a EDP, Energias de Portugal (EDPP/DPI e EDPP/DPH-PHSB em particular o apoio em obra do técnico Manuel Gonçalves), o NO/DBB/LNEC, o LABEST/FEUP, e a NewMENSUS, Lda.

REFERÊNCIAS

- [1] Udd, E. (1995). An overview of fiber-optic sensors. *Review of Scientific Instruments*, 66(8), pp.4015-4030.
- [2] Kersey, AD; Davis, MA; Patrick, HJ; LeBlanc, M; Koo, KP; Askins, CG; Putnam, MA; Friebele, EJ. (1997). Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), pp.1442-1462.
- [3] Measures, R. (2001). Structural monitoring with fiber optic technology. London: Academic Press.
- [4] Majumder M, Gangopadhyay TK, Chakraborty AK, Dasgupta K, Bhattacharya DK. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 147(1), pp.150-164.
- [5] Figueiras, J. (2008). Monitorização da integridade estrutural de obras de arte. BE2008 – Encontro Nacional de Betão Estrutural.
- [6] Rodrigues, C.; Félix, C.; Laje, A.; Figueiras, J. (2010). Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges. *Engineering Structures*. 32 (8), pp.1993-2002.
- [7] Rodrigues, C; Faria, Rémy; Figueiras, J.(2012). Monitorização experimental da nova barragem do Alto Ceira usando a tecnologia da fibra ótica, Relatório Técnico, LABEST/FEUP.
- [8] EDP. (2007) Aproveitamento hidroelétrico de Santa Luzia. Barragem do Alto Ceira: Memória descritiva.
- [9] Cunha, J.; Silva Matos, D. (2008). The new Alto Ceira Dam – an example of the substitution of an existing dam. In Hidro 2008.
- [10] Silva Matos, D.; Pimentel, R.; Figueiras, J.; Rodrigues, C.; Faria, Rémy, Tavares de Castro, A. (2012). Novel fiber optic transducers embedded into concrete mass applied to the New Alto Ceira Dam. Proc. of Dam World Conference, CBC2012-Oct/2012, IBRACON-ISSN 2175-8182.
- [11] Rodrigues, C. (2011). Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra ótica. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [12] EDP. (2007). Aproveitamento hidroelétrico de Santa Luzia. Nova Barragem do Alto Ceira. Plano de observação. EDP.
- [13] LNEC (2007). Revisão do plano de observação da nova barragem do Alto Ceira. LNEC.