

Monitorização dos efeitos estruturais das reações expansivas do betão nas pontes do Criz II e de São João das Areias

Monitoring of the structural effects of the concrete swelling reactions in the Criz II and the São João das Areias bridges

Luís Oliveira Santos

Xu Min

Luís Freire

Resumo

As pontes de São João das Areias e do Criz II foram afetadas pelo desenvolvimento de reações expansivas do betão, que danificaram particularmente os seus pilares e fundações, motivando importantes trabalhos de reabilitação destes elementos estruturais. No decurso destes trabalhos, as duas obras de arte foram instrumentadas visando proceder à caracterização dos efeitos estruturais das referidas reações expansivas, tanto em termos da perda de rigidez como da sua evolução ao longo do tempo.

Abstract

Both São João das Areias Bridge and Criz II Bridge were attacked by internal swelling reactions of concrete. The attack was particularly serious in the piers and foundations, motivating important rehabilitation works on these structural elements. During these works, a Structural Health Monitoring system was set up in both bridges in order to monitor the structural effects of these reactions, both in terms of the loss of rigidity and of its propagation over time.

Palavras-chave: Ponte betão armado / Monitorização estrutural / Reações expansivas do betão

Keywords: Concrete bridge / Structural monitoring / Internal swelling reactions in concrete

Luís Oliveira Santos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Departamento de Estruturas
Lisboa, Portugal
luis.osantos@lnec.pt

Xu Min

Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Departamento de Estruturas
Lisboa, Portugal
xumin@lnec.pt

Luís Freire

Infraestruturas de Portugal
Lisboa, Portugal
luis.freire@infraestruturasdeportugal.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SANTOS, L. [et al.] – Monitorização dos efeitos estruturais das reações expansivas do betão nas pontes do Criz II e de São João das Areias. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 9. ISSN 2183-8488. (março 2019) 101-108.

1 Introdução

As pontes de São João das Areias e do Criz II (bem como a ponte do Criz I) foram projetadas pelo Prof. Edgar Cardoso, partilhando a mesma solução estrutural, tendo sido construídas entre 1976 e 1979. Tal como a generalidade das obras de arte inseridas na rede viária da Barragem da Aguieira, estas pontes foram afetadas por reações expansivas do betão, nomeadamente reações álcalis-silica (RAS) e sulfática interna (RSI), cujo diagnóstico foi efetuado através de um conjunto de ensaios laboratoriais, que permitiram caracterizar os fenómenos expansivos e a avaliação do potencial de expansão.

Estas reações expansivas afetaram particularmente os pilares e as fundações destas obras de arte, motivando uma empreitada para a sua reabilitação, concluída em dezembro de 2017. Estes trabalhos de reabilitação constituíram uma excelente oportunidade para se proceder à caracterização *in situ* dos efeitos estruturais das referidas reações expansivas, através de uma adequada monitorização do seu comportamento em serviço.

Pretende-se nesta comunicação divulgar o trabalho experimental realizado, os objetivos que nortearam a sua definição e a forma como foi implementado, uma vez que se trata de um trabalho pioneiro numa temática que tem vindo a causar uma preocupação crescente no meio técnico nacional.

2 Descrição das obras de arte e dos projetos de reabilitação

2.1 Solução estrutural

As duas obras de arte são de betão armado pré-esforçado, partilhando a mesma solução estrutural, constituída por um tabuleiro, com 15,20 m de largura, que acomoda uma faixa de rodagem com duas vias, cuja secção transversal é composta por uma laje vigada, com quatro vigas longitudinais afastadas entre si de 4 m e por carlingas nas secções de apoio, de meio vão dos tramos extremos e de terços de vão dos tramos intermédios.

Os pilares são de betão armado, compostos por um único fuste, de secção transversal oca, em forma de losango com vértices agudos chanfrados, inscrita num retângulo com 6,0 m × 3,0 m, tendo as paredes uma espessura de 0,20 m. Os pilares são encimados por um capitel, cuja altura varia entre 1,00 m e 3,00 m, com uma espessura de 0,80 m, que suporta os aparelhos de apoio. No topo dos pilares foram previstos alçapões de acesso ao interior. Ao nível inferior, os pilares dispõem de um embasamento, igualmente com secção oca em losango, com uma espessura de parede de 0,70 m, que faz a ligação à fundação. A fundação é direta, através de sapatas de forma octogonal irregular, inscrita num retângulo com 8,0 m × 4,0 m, e com uma altura de 1,50 m.

2.2 Ponte do Criz II

A ponte sobre o rio Criz, situada ao km 59,3 da EN 234, no trecho Barril – Santa Comba Dão, correntemente designada por Ponte do Criz II, é constituída por oito tramos, com vãos extremos de 30 m e

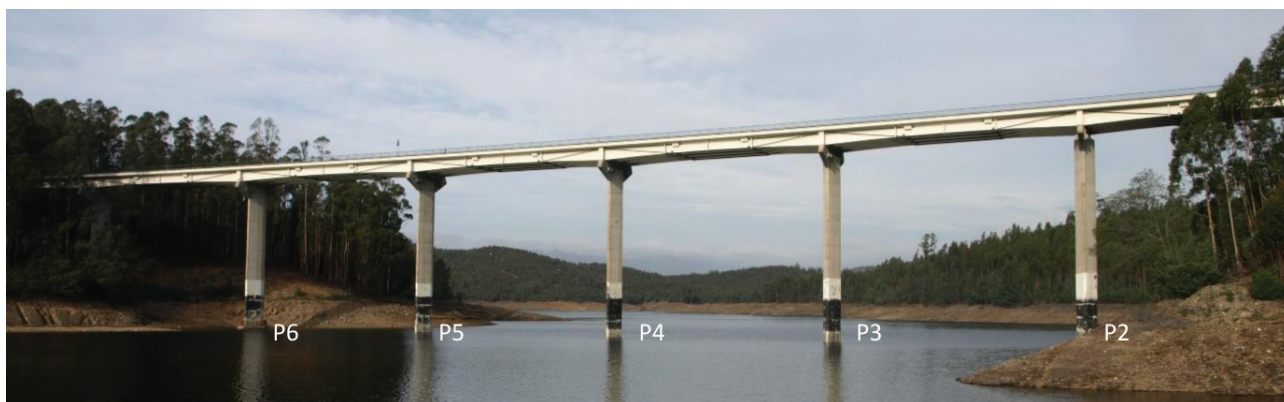


Figura 1 Ponte do Criz II antes da reabilitação dos pilares e fundações



Figura 2 Ponte do Criz II no final da reabilitação dos pilares e das fundações

seis vãos intermédios de 40 m, que perfazem um comprimento total de 300 m (Figura 1). As alturas dos pilares variam entre cerca de 27 m e 70 m, sendo que os pilares P2 a P6 se encontram fundados no interior da albufeira, com uma profundidade máxima de cerca de 35 m (pilar P3).

Após a realização entre 2007 e 2010 da reabilitação e reforço estrutural dos encontros, capitéis dos pilares e tabuleiro, que foi reforçado com pré-esforço exterior [1], a reabilitação dos pilares e fundações, em 2016 e 2017, consistiu na substituição das sapatas dos pilares extremos por novas sapatas e, nos restantes pilares, na execução de estacas $\phi 1,50$ m com camisa metálica perdida, encabeçadas por maciços em betão armado pré-esforçado (Figura 2), que garantirão a transferência de carga para as novas fundações, caso seja necessário [2].

O fuste dos pilares P2, P3 e P4, que apresentam alturas totais de cerca de 60 m, foram também reforçados por meio de encamisamento em betão armado acima da cota de topo do maciço de estacas até à cota de 145,5 m. De forma a eliminar a diferença de pressões nas paredes dos fustes, devido às pressões da betonagem do maciço, foram simultaneamente betonados os maciços de encabeçamento das estacas e, com betão simples, o interior dos fustes, entre as cotas 120,00 e 126,50.

2.3 Ponte de São João das Areias

A Ponte São João das Areias sobre o rio Mondego situa-se na EN 234-6 entre o km 005+114 e km 005+375. A ponte tem um comprimento total de 260 m, que se divide em sete tramos, os



Figura 3 Ponte de São João das Areias antes da reabilitação dos pilares e fundações



Figura 4 Vista geral da Ponte de São João das Areias no final da reabilitação dos pilares e das fundações

interiores com vãos de 40 m e os extremos com vãos de 30 m (Figura 3). A altura dos pilares da ponte varia entre 17,2 m e 50,6 m. Entre 2011 e 2012, a obra de arte beneficiou de uma intervenção visando o reforço estrutural do tabuleiro e dos encontros, que incluiu a substituição dos aparelhos de apoio e a alteração das condições de apoio, tendo sido instalados quatro amortecedores viscosos no encontro esquerdo [3].

O projeto de reabilitação dos pilares e das fundações, da autoria do Prof. Júlio Appleton [4], incidiu fundamentalmente sobre os pilares P2 a P5, que estão implantados na albufeira e que apresentam danos devidos às reações expansivas. Nos pilares P2 a P4 foram executadas estacas $\phi 1,20$ m em torno da sapata existente, ligadas ao pilar através de maciços pré-esforçados, uma solução semelhante à utilizada na ponte do Criz II. O pilar P5 foi reforçado através da execução de microestacas, solidarizadas com o pilar por recurso a um maciço de betão armado pré-esforçado com 1,50 m de espessura, realizado à mesma cota que os restantes maciços.

Nestes quatro pilares foi implementada uma solução de encamisamento exterior do fuste do pilar entre a face superior

do novo maciço e uma cota superior em 0,50 m à cota máxima de exploração da albufeira, que é de 126,30 m (Figura 4). O encamisamento, realizado com betão moldado com 0,14 m de espessura, visa proporcionar um confinamento nas zonas onde os pilares apresentam maior fissuração e limitar o acesso de água ao betão original da ponte [5]. Complementarmente, foi preenchido o interior do pilar com betão leve simples, até a uma cota igual à do topo do encamisamento exterior.

3 Monitorização efetuada

Os sistemas de monitorização estrutural instalados em ambas as obras durante os trabalhos de reabilitação dos pilares e fundações são semelhantes. O seu objetivo específico é a caracterização do comportamento estrutural associado ao processo expansivo do betão, em particular da parte submersa dos pilares. O desenvolvimento das reações expansivas do betão irá, previsivelmente, diminuir a rigidez do betão, o que irá originar uma transferência de carga do fuste original dos pilares para as estacas. Pretende-se, por um lado,

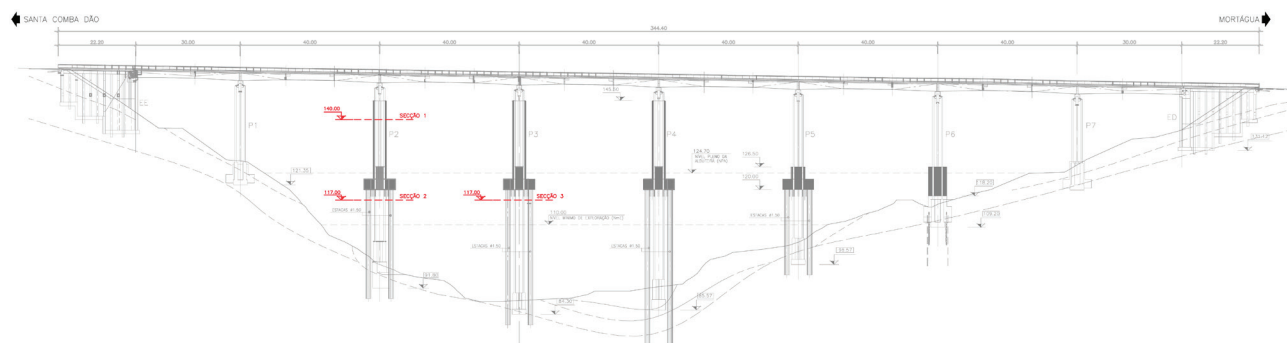


Figura 5 Ponte do Criz II: localização das secções instrumentadas

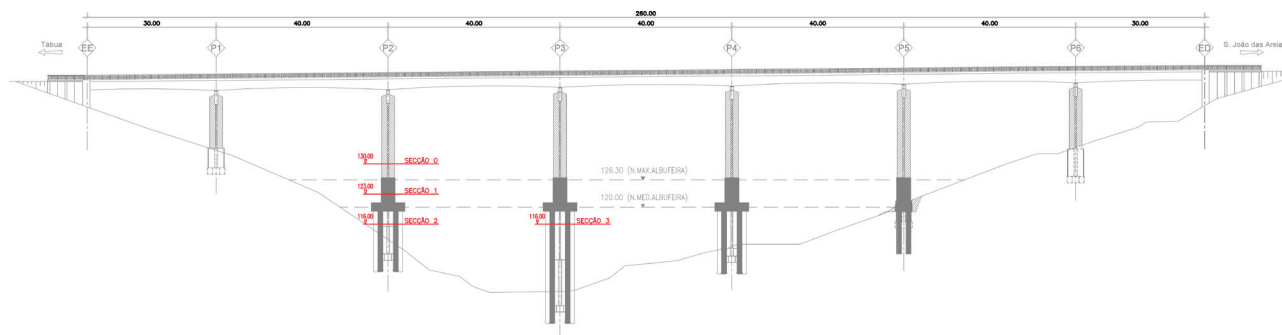


Figura 6 Ponte de São João das Areias: localização das secções instrumentadas

quantificar o processo de degradação do betão afetado, isto é, a perda de rigidez dos pilares, e, por outro lado, aferir a sua evolução ao longo do tempo.

A satisfação dos requisitos referidos será baseada na medição das extensões nas estacas de dois pilares de cada ponte. Com efeito, a previsível transferência de cargas do fuste dos pilares para as estacas será monitorizada, em ambas as pontes, através dos extensómetros de corda vibrante instalados no interior das estacas dos pilares nos pilares P2 e P3, a uma cota frequentemente atingida pelo nível da água. A disposição das secções instrumentadas desta forma (secções S2 e S3) é idêntica nas duas obras, como se pode observar na Figura 5, relativa à Ponte do Criz II, e na Figura 6, referente à Ponte de São João das Areias.

Estes extensómetros foram instalados nas armaduras das estacas, quando estas ainda se encontravam junto ao estaleiro (Figura 7). O seu posicionamento vertical foi garantido através da fixação a duas barras posicionadas para esse efeito que foram soldadas às armaduras principais das estacas. Posteriormente, as armaduras foram transportadas numa barça até ao respetivo pilar e instaladas no interior da camisa metálica. Na Figura 8 apresenta-se um pormenor de um extensómetro de corda vibrante durante a instalação da armadura no interior da camisa metálica, precedendo a betonagem da estaca (Figura 9).

Para o mesmo efeito, em cada face dos pilares instrumentados foi também instalado um extensómetro na superfície do fuste original,

com uma orientação vertical (Figura 10), disposto à mesma cota dos sensores das estacas. Nessas secções foram ainda instalados dois extensómetros com uma orientação horizontal, minimizando a influência do carregamento, de forma a detetar os fenómenos expansivos do betão. Representa-se na Figura 11 a disposição dos sensores nas duas secções instrumentadas ao nível das estacas, em ambas as pontes.

O facto de os pilares instrumentados serem encamisados desde o maciço de encabeçamento das estacas, quase integralmente no caso da ponte do Criz II e parcialmente no caso da ponte de São João das Areias, motivou a instrumentação de uma secção neste troço de um dos pilares instrumentados, de forma a melhor caracterizar o eventual processo de transferência de esforços. Para este efeito, foi instrumentada uma secção do pilar P2 (secção S1 em ambas as pontes) com oito extensómetros de embeber no betão, dois em cada parede do encamisamento do fuste (Figura 12).

Por fim, atendendo a que parte significativa dos pilares da Ponte de São João das Areias não foi encamisada, numa secção próxima do topo do pilar P2 (secção S0) foram instalados dois extensómetros de corda vibrante superficiais, bem como dois LVDT, visando monitorizar a evolução da sua deformação. Complementarmente foram instalados sensores de resistividade ao longo da espessura de duas paredes com diferentes condições de exposição, conjuntamente com sensores de temperatura do tipo PT100, tendo em vista a monitorização da humidade no interior do betão, decorrente nomeadamente da pluviosidade (Figura 13).



Figura 7 Extensómetro instalado na armadura de uma estaca

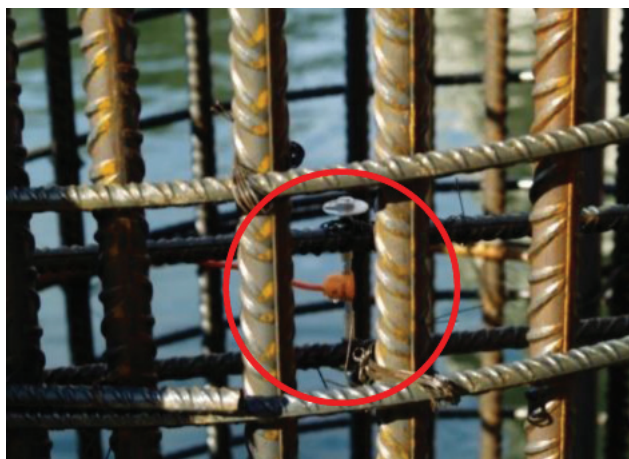


Figura 8 Extensómetro durante o posicionamento de armadura

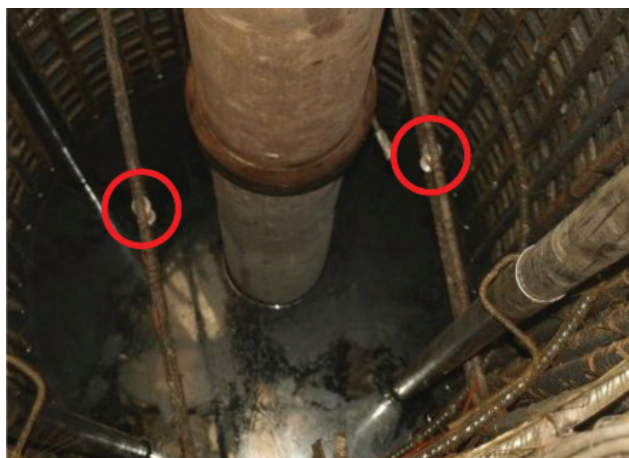


Figura 9 Extensómetros durante a betonagem de estaca

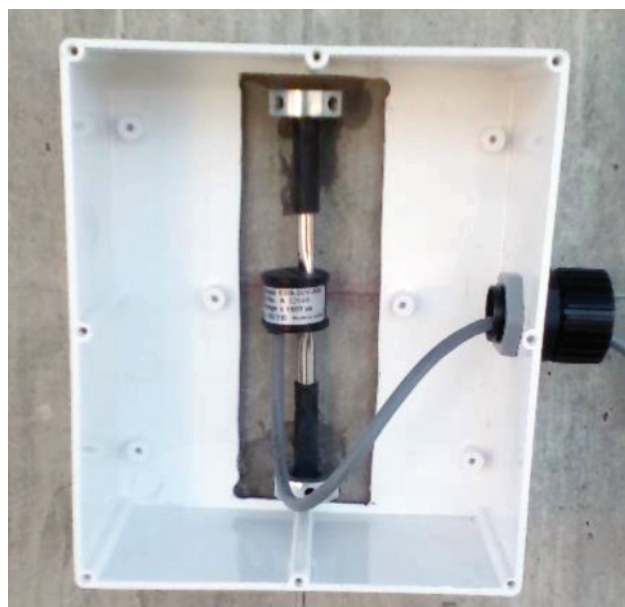


Figura 10 Extensómetro na superfície do fuste original de pilar

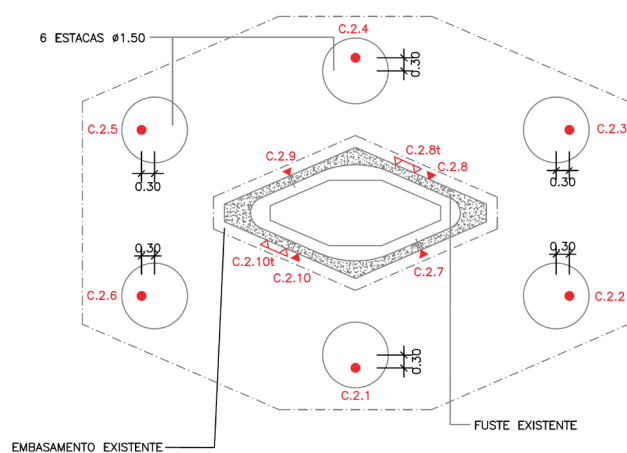


Figura 11 Disposição dos extensómetros nas estacas e na superfície do fuste original dos pilares

A medição da temperatura ambiente é assegurada por um termómetro elétrico de resistência do tipo Pt100, posicionado sob o tabuleiro, no topo do pilar P2. No interior do betão a temperatura será medida pelos termístores incorporados nos extensómetros de embeber, para além dos termómetros do tipo Pt100 embebidos no interior do betão, como representado na Figura 13. De igual modo, os extensómetros instalados à superfície possuem termístores incorporados.

Em ambas as pontes, as medições realizadas com os sensores instalados nos pilares P2 e P3 são centralizadas no topo do pilar P2, onde está instalado um armário contendo dois módulos de expansão de canais *Datataker CEM20*. Para este efeito os cabos foram fixados

ao fuste do respetivo pilar, sendo os cabos provenientes do pilar P3 posteriormente elevados para o tabuleiro e conduzidos pela caleira técnica até ao topo do pilar P2. Estes módulos estão, por sua vez, ligados através de cabos alojados na caleira técnica a um *logger Datalogger DT80G*, instalado no encontro E1, permitindo a realização automática das medições com os diversos sensores. O acesso remoto à informação obtida é assegurado por um *router* também instalado no encontro E1.

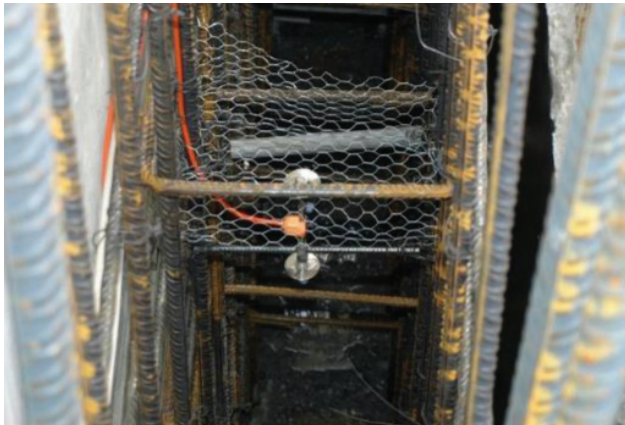


Figura 12 Extensómetro no interior do betão de encamisamento

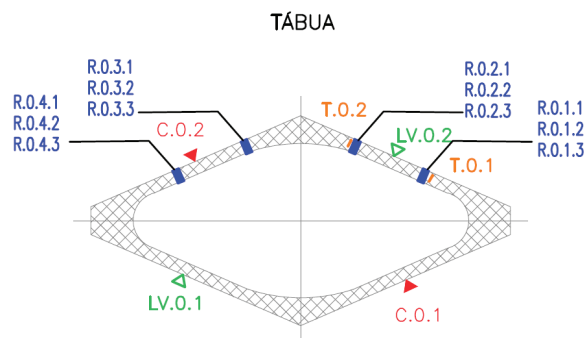


Figura 13 Secção instrumentada no fuste existente

4 Resultados iniciais

A morosidade dos processos expansivos torna expectável que apenas se possam extrair conclusões ao fim de alguns anos de monitorização. Contudo, os resultados iniciais são fundamentais para a caracterização da situação atual e, consequentemente, para a deteção de eventuais alterações decorrentes da degradação do betão.

A título ilustrativo apresentam-se alguns dos resultados obtidos desde o início do corrente ano, nomeadamente, a evolução das

extensões no betão de encamisamento do pilar P2, na Figura 14, e nas estacas do pilar P3, na Figura 15, ambas relativas à ponte do Criz II e evidenciando uma variação que não é significativa.

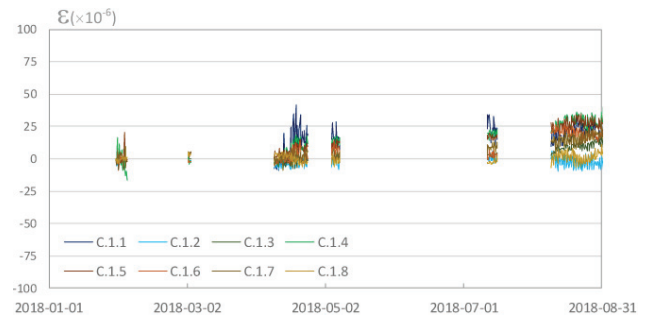


Figura 14 Ponte do Criz II: extensões no betão de encamisamento do pilar P2

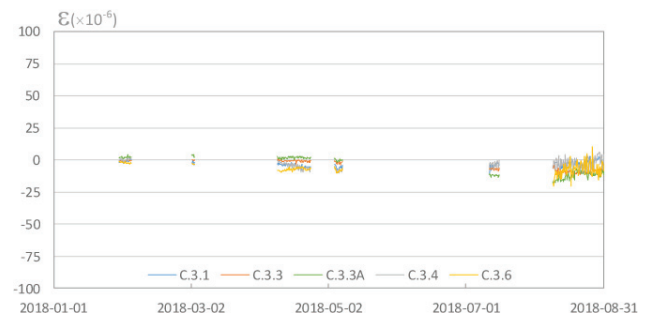


Figura 15 Ponte do Criz II: extensões nas estacas do pilar P3

De igual forma, a Figura 16 é constituída pela representação das temperaturas medidas no interior destas estacas do pilar P3, conjuntamente com a temperatura ambiente, medida ao nível do tabuleiro. Ressalta desta figura a menor amplitude da temperatura no interior das estacas, como expectável.

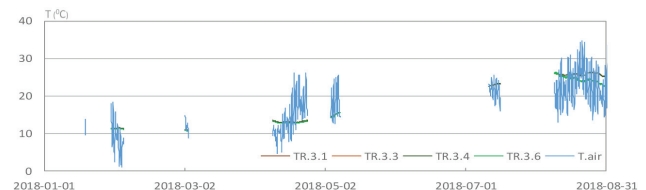


Figura 16 Ponte do Criz II: temperatura ambiente e no interior das estacas do pilar P3

Por fim, apresentam-se as extensões medidas nas estacas dos dois pilares instrumentados na Ponte de São João das Areias, bem como nos respetivos fustes originais: a Figura 17 é constituída pelos valores medidos no pilar P2 e na Figura 18 estão representados os valores medidos no pilar P3.

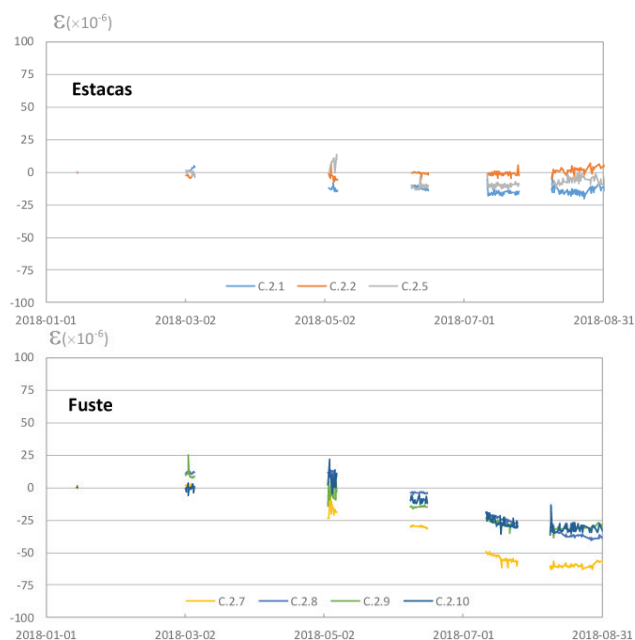


Figura 17 Ponte de S. João das Areias: extensões medidas nas estacas e no fuste do pilar P2 (secção S2)

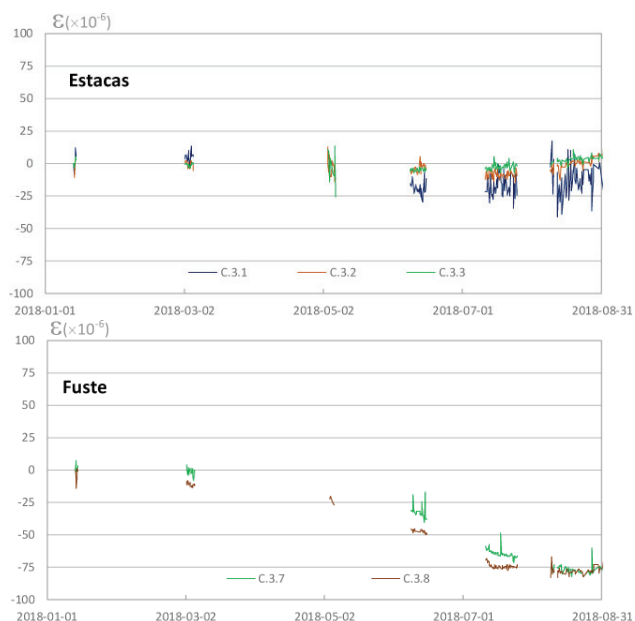


Figura 18 Ponte de S. João das Areias: extensões medidas nas estacas e no fuste do pilar P3 (secção S3)

Em ambos os casos, as deformações não variam de forma significativa, embora se verifique uma tendência de alongamento nos sensores instalados no fuste dos pilares.

5 Considerações finais

Os sistemas de monitorização da integridade estrutural instalados nas Pontes do Criz II e de São João das Areias, para além do contributo que dará para uma gestão eficiente da obra através da recolha de informação experimental relativa à segurança, funcionalidade e durabilidade, constitui uma oportunidade pioneira de caracterizar os efeitos estruturais decorrentes das reações expansivas do betão. Com efeito, a degradação do betão resultante do desenvolvimento das reações expansivas irá provocar uma perda de rigidez que, no sistema estrutural resultante do reforço dos pilares e fundações, dará origem a uma transferência de carga destes elementos para as estacas.

Os referidos sistemas de monitorização foram concebidos com um grande foco nesta questão, compreendendo a medição de extensões no interior do betão das estacas dos pilares P2 e P3 e a medição de extensões à superfície do betão do fuste destes pilares numa cota abaixo do maciço de encabeçamento das estacas. Foram também instalados extensómetros de corda vibrante no interior do betão de encamisamento do pilar P2, a uma cota significativamente superior à do maciço, de forma a detetar uma eventual participação deste betão na sustentação das cargas. A medição de temperaturas no interior e à superfície do betão é assegurada pelos termístores incluídos nos extensómetros de corda vibrante utilizados, sendo a temperatura ambiente medida através de um termómetro elétrico de resistência. O sistema de aquisição e transmissão de dados permite a realização destas tarefas de forma automática.

Os primeiros resultados obtidos são ainda precoces, face à morosidade com que se processam os fenómenos expansivos. Os resultados futuros perspetivam-se relevantes para uma melhor compreensão do desempenho destas obras e, principalmente, pelo contributo que o conhecimento adquirido dará para a fundamentação de decisões relativas a outras obras afetadas pelo mesmo problema.

Referências

- [1] TRIEDE (2005) – EN 234 – Pontes sobre o rio Criz (I e II): Projecto de Reabilitação e Reforço Estrutural, Projeto de execução.
- [2] TRIEDE (2011) – EN 234 – Pontes sobre o rio Criz (I e II): estudo de reabilitação/substituição dos pilares, Projeto de execução.
- [3] CivilSer (2006) – Reabilitação e reforço da ponte de São João das Areias na EN 234-6. Projeto de execução.
- [4] A2P (2011) – Reabilitação dos pilares da ponte de S. João das Areias sobre o rio Mondego, na EN 234-6. Projeto de execução.
- [5] Appleton, Júlio (2016) – "Reabilitação da ponte de S. João das Areias". // Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão. Lisboa