



MONITORIZAÇÃO DAS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DAS REAÇÕES EXPANSIVAS DO BETÃO NA PONTE DO RIO SABOR NA N315

Luís Oliveira Santos¹, Elsa Pereira², António Santos Silva³, António Bettencourt Ribeiro⁴, Xu Min⁵
¹Departamento de Estruturas, LNEC, luís.osantos@lnec.pt, ²Departamento de Materiais, LNEC, epereira@lnec.pt,
³Departamento de Materiais, LNEC, ssilva@lnec.pt, ⁴Departamento de Materiais, LNEC, bribeiro@lnec.pt,
⁵Departamento de Estruturas, LNEC, xumin@lnec.pt

RESUMO

O crescente número de estruturas de betão afetadas por reações expansivas, em particular com reação álcalis-sílica (RAS) e reação sulfática interna (RSI), tem motivado numerosos estudos visando a prevenção, o diagnóstico e a mitigação deste fenómeno.

O presente trabalho apresenta um caso de estudo de uma ponte sobre o rio Sabor, no Norte de Portugal, cujos pilares principais foram submersos devido à construção de uma barragem a jusante. Nestas circunstâncias, foi realizada uma campanha de ensaios para avaliar a condição atual do betão e o potencial de expansão futuro devido à RAS e RSI. Os resultados obtidos mostraram existir uma forte possibilidade de desenvolvimento desses fenómenos, pelo que foi recomendado, como medida mitigadora, a aplicação de um sistema de impermeabilização do betão dos pilares da ponte, antes do enchimento da albufeira, uma vez que o aumento do grau de saturação do betão tem influência significativa no desenvolvimento destas reações.

Para avaliar o desempenho do sistema de impermeabilização e detetar precocemente os efeitos estruturais resultantes duma eventual ocorrência de reações expansivas no betão, foi instalado um sistema de monitorização que inclui a medição da humidade no interior do betão de um pilar, tendo-se utilizado, para esse efeito, dois tipos distintos de sensores.

Depois de uma breve descrição da ponte e do processo adotado para mitigar o desenvolvimento das reações expansivas internas no betão, o foco desta comunicação é a apresentação do sistema de monitorização concebido e dos principais resultados obtidos.

Palavras-chave: Reações expansivas / Ponte de betão / Mitigação / Monitorização



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

1 INTRODUÇÃO

Um número crescente de estruturas de betão tem sido diagnosticado com reações expansivas, em particular com reação álcalis-sílica e reação sulfática interna (Hobbs 1988, Grattan-Bellew 1992, Idorn 1989). Em Portugal, várias barragens foram afetadas por este fenómeno, o que tem motivado numerosos estudos a fim de melhorar a capacidade de prevenir, diagnosticar e mitigar este fenómeno e os seus efeitos estruturais (Silva *et al.*, 2008). Mais recentemente, também algumas pontes foram atingidas por este tipo de degradação do betão, exigindo a realização de importantes trabalhos de reabilitação e, em alguns casos, a sua substituição (Appleton & Costa 2001, Appleton 2015, Silva *et al.* 2010).

Este trabalho apresenta um caso de estudo de uma ponte sobre o rio Sabor, no Norte de Portugal, cujos pilares principais foram submersos devido à construção do escalão de montante do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor. Por solicitação da EDP, antecedendo o enchimento da albufeira, foram realizados estudos no LNEC visando a determinação do potencial reativo do betão dos pilares centrais da ponte que ficarão em grande parte submersos. Estes estudos indicaram uma forte possibilidade desta obra de arte vir a ser afetada por reações expansivas do betão do tipo álcalis-sílica (RAS) e sulfática interna (RSI). Nestas circunstâncias foi realizada uma intervenção preventiva que consistiu na impermeabilização do betão dos pilares da ponte.

Neste contexto, a obra de arte foi instrumentada com o objetivo de, por um lado, avaliar o desempenho do sistema de impermeabilização aplicado e, por outro lado, detetar os efeitos estruturais decorrentes da eventual ocorrência das referidas reações expansivas. A monitorização do sistema de impermeabilização do betão dos pilares incidiu sobre três secções do pilar P3, situadas em diferentes níveis, correspondentes às condições de exposição do pilar à água: a zona inferior, permanentemente submersa; uma zona intermédia, submersa apenas em parte do ano; e a parte superior, sempre emersa, sendo molhada apenas na face exterior por ação da chuva.

Após uma breve descrição da ponte e do processo adotado para mitigar o desenvolvimento das reações expansivas internas no betão, o foco desta comunicação incide sobre o sistema de monitorização instalado e os principais resultados obtidos desde a instalação deste sistema, em maio de 2014.



2 DESCRIÇÃO DA PONTE SOBRE O RIO SABOR

A ponte do rio Sabor, inaugurada em 2004, situa-se na EN 315 no lanço Sardão-Meirinhos, que coincide com o corredor definido para o IC5 conforme Plano Rodoviário Nacional 2000, inserindo-se numa curva circular em planta com um raio de 270m. É uma obra contínua ao longo da sua extensão total de 560 m, com um vão central de 160 m, vãos adjacentes de 125 m e vãos extremos de 75 m (Fig. 1).

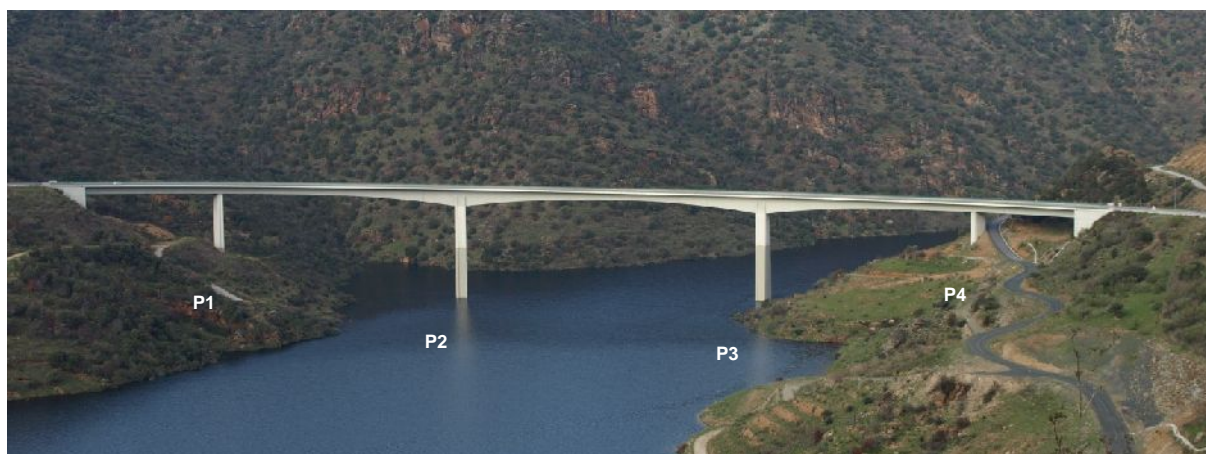


Fig. 1 – Vista de jusante da ponte

O tabuleiro, com uma plataforma de 13 m, é estruturalmente constituído por um caixão unicelular em betão armado pré-esforçado, com uma altura variável entre 9 m, sobre os pilares centrais, e 4 m na zona de meio vão do tramo central e dos tramos adjacentes, que se mantém até aos encontros. A ligação do tabuleiro aos pilares centrais é monolítica, enquanto nos restantes pilares e nos encontros se realiza através de aparelhos de apoio.

Os pilares extremos, com alturas de 33 m e 15,5 m, possuem uma secção oca retangular constante, com a maior dimensão na direção transversal.

Os pilares centrais, designados P2 (75m) e P3 (68m), possuem igualmente um fuste de secção em caixão, cuja dimensão máxima cresce linearmente (3%) do topo para a base na direção transversal e é constante na direção longitudinal. As paredes dos fustes destes pilares possuem uma espessura constante e aberturas afastadas entre si de 5 m em altura, destinadas a anular os desequilíbrios de impulsos hidráulicos entre a face exterior e interior da parede (Cruz, 2002). Estes pilares são pré-esforçados verticalmente de forma excêntrica, com o objetivo de contrariar o efeito do peso próprio do tabuleiro.

Os encontros são do tipo cofre, constituídos por muros de avenida e muros de testa, apoiados em gigantes de espessura constante e largura crescente em profundidade, encastrados na sapata de fundação (Cruz, 2004).



3 ENSAIOS LABORATORIAIS DO BETÃO

Os ensaios realizados visaram a determinação da reatividade potencial e residual em condições aceleradoras da reação álcalis-sílica (RAS) e da reação sulfática interna (RSI). Para este efeito foram extraídas diversas carotes dos pilares centrais e dos respetivos maciços de encabeçamento de estacas.

Efetuaram-se ensaios microscópicos (petrográficos e de microscopia eletrónica de varrimento – MEV - com microanálise de raios X - EDS) com o objetivo de identificar a presença de compostos expansivos, nomeadamente produtos da reação álcalis-sílica ou etringite deletéria, e ensaios de expansão residual realizados em condições aceleradoras da reação álcalis-sílica e da reação sulfática interna, que permitem prever a evolução futura dessas reações expansivas.

Foram ainda efetuados outros ensaios para complementar o diagnóstico e prognóstico, que incluíram ensaios mecânicos (resistência à compressão, resistência à tração e de determinação da perda de rigidez), mineralógicos (difração de raios X e análise térmica) e químicos (determinação dos teores de álcalis, sulfatos, sílica e cimento).

O programa de ensaios laboratoriais, nomeadamente por observação ao MEV/EDS, confirmou a ocorrência de RAS (Fig. 2a) e RSI (Fig. 2b) e a existência no betão de potencial remanescente para a expansão devida a estes dois tipos de reação.

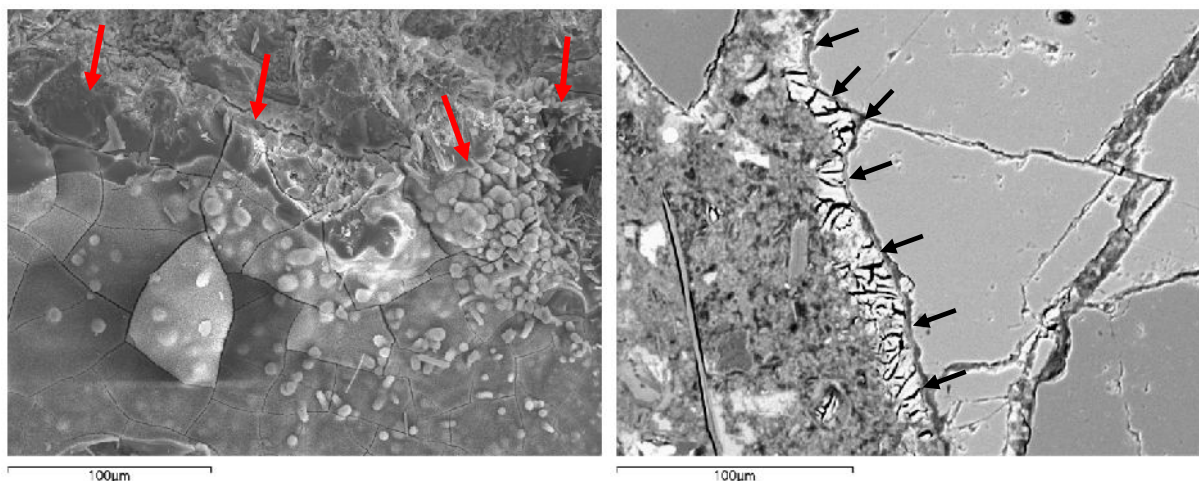


Fig. 2 – Imagens ao MEV que mostram interfaces agregado/pasta com: a) Gel RAS (setas vermelhas); b) etringite deletéria (setas escuras)



4 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

O desenvolvimento de reações álcalis-sílica e sulfática interna é acelerado pela humidade e pela temperatura (Larive 1998, Olafsson 1986, Tomosawa *et al.* 1989), pelo que a intervenção preventiva relativamente a esse desenvolvimento consistiu na impermeabilização dos dois pilares através de um revestimento protetor. Este revestimento, de poliureia de secagem rápida e com elevada capacidade de *crack-bridging*, foi aplicado nas superfícies interior e exterior dos dois pilares, desde a base até ao Nível Máximo de Cheia (NMC).

O NMC da barragem do Baixo Sabor é de 235 m, o que implica a submersão dos pilares centrais em cerca de 50 m, uma vez que as suas fundações estão às cotas de 180 m (P2) e de 184 m (P3).

A Fig. 3 mostra duas vistas da ponte: uma obtida durante os trabalhos de impermeabilização (esquerda); a outra após a conclusão desses trabalhos.



Fig. 3 – Vista da ponte durante e após os trabalhos de impermeabilização. As setas na imagem à direita indicam a cota máxima de aplicação do revestimento.

5 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

5.1 Considerações gerais

O sistema de monitorização instalado visa avaliar o desempenho do sistema de impermeabilização, bem como a deteção precoce dos efeitos estruturais decorrentes dum eventual desenvolvimento das reações expansivas no betão. Para este efeito, o sistema de monitorização compreende três vertentes: a monitorização das condições ambientais, a monitorização da eficiência da impermeabilização e a monitorização estrutural. Uma outra grandeza da maior relevância para este efeito é a evolução do nível da albufeira, que é registado no âmbito da exploração do aproveitamento hidroelétrico.



5.2 Monitorização das condições ambiente

A caracterização do ambiente exterior afigura-se relevante, permitindo relacionar a sua evolução com os valores medidos no interior do betão nas zonas emersas. Para este efeito foi instalado na face inferior do tabuleiro um sensor de temperatura e humidade relativa do ar, da marca Vaisala, modelo HMP155D.

5.3 Monitorização da impermeabilização do betão

O sistema de impermeabilização aplicado nos pilares centrais da ponte visa reduzir fortemente o acesso da água ao betão e, desta forma, mitigar a ocorrência de reações expansivas. Consequentemente, a avaliação do estado de humidade no interior do betão afigura-se como uma forma expedita de verificar a eficácia desse sistema.

Para este efeito foram instrumentadas três secções do pilar P3, correspondentes às três condições de exposição do pilar à água: a secção S1, localizada abaixo do Nível Mínimo de Exploração (NME), que ficará permanentemente submersa; a secção S2, que ficará parte do ano submersa e uma outra parte emersa; a secção S3, situada acima do Nível de Pleno Armazenamento (NPA) e do Nível Máximo de Cheia (NMC), que ficará sempre emersa, sendo molhada apenas na face exterior por ação da chuva, tal como assinalado na Fig. 4.

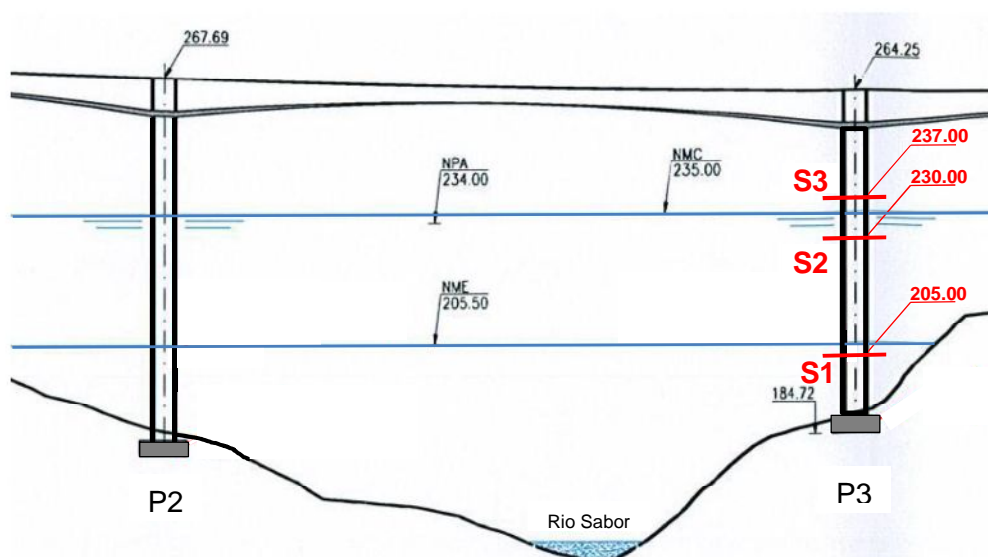


Fig. 4 – Localização das secções instrumentadas no pilar P3

A medição da evolução da humidade no interior do betão é baseada em medidas de resistividade elétrica, complementada pontualmente por sensores de humidade. A opção de instrumentar a obra com sensores de resistividade deveu-se ao facto dos sensores de humidade para embeber no betão existentes no mercado, para além de terem um custo



bastante superior, apresentarem algumas restrições ao nível da estabilidade da calibração a longo prazo. De facto, o período de calibração médio dado pelos fabricantes destes sensores é de apenas 6 meses, incompatível com o período de monitorização espectável.

A resistividade elétrica do betão é um parâmetro que depende da capacidade deste material para transportar carga elétrica, que, por sua vez, é determinada, fundamentalmente, pela estrutura porosa do betão, grau de humidade, concentração iónica na solução intersticial e temperatura. Deste modo, a sua medição pode dar indicação sobre a capacidade protetora do revestimento por pintura aplicado, no que se refere a limitar o acesso de água, aspeto relevante para a inibição da progressão dos fenómenos expansivos, bem como da evolução da corrosão das armaduras. Em simultâneo com a resistividade, é medida a temperatura no interior do betão, pois este parâmetro influencia as medições da resistividade.

Neste trabalho desenvolveram-se sensores de resistividade especialmente concebidos para colocação no betão em zonas imersas (Pereira 2004, Santos 2005, Salta e Pereira 1998). Colocaram-se vários conjuntos de sensores, constituídos por dois elétrodos de grafite com cerca de 10 mm de diâmetro e de altura, a diferentes profundidades em carotes, com 10 cm de diâmetro, extraídas das secções referidas e que foram instrumentadas no LNEC (Fig. 5).



Fig. 5 – Carotes instrumentadas em laboratório com os sensores de resistividade

Os elétrodos foram colocados em orifícios de diâmetro adequado criados nas carotes e selados com um material cimentício que garante o contacto eletrolítico. Os contactos elétricos foram devidamente protegidos com uma resina epoxídica, tendo as carotes sido recolocadas na estrutura, devidamente tamponadas, de forma a não constituírem pontos preferenciais de passagem de água. Entre cada conjunto de dois elétrodos mede-se, com uma periodicidade diária, a resistência elétrica a dois pontos com um sistema de aquisição automática de dados. Antes da colocação, os sensores foram calibrados em laboratório em soluções de



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

condutividade conhecida para possível conversão dos valores de resistência elétrica em resistividade. Em simultâneo com a resistividade, é medida a temperatura no interior do betão, pois este parâmetro influencia as medições da resistividade.

Na secção S1, que permanece imersa, as condições de exposição são idênticas no exterior e interior do pilar, pelo que apenas foi instrumentada a face interna. Para este efeito, procedeu-se à execução de duas carotes, com uma profundidade de 30 cm. Em cada carote foram instalados sensores de resistividade distando 3 cm, 5 cm e 20 cm da superfície.

Na secção S2, localizada numa zona que estará parte do ano emersa e outra parte imersa, foram instrumentadas quatro carotes: duas idênticas às descritas para a secção S1; duas outras, com um comprimento de 20 cm, foram extraídas a partir da face exterior da mesma parede do pilar. Este procedimento foi motivado pelas diferentes condições de exposição das duas faces: quando a secção estiver emersa a superfície interior terá uma maior humidade, enquanto a parede exterior estará sujeita à ação dos raios solares e da chuva.

Na secção S3, que permanece emersa, as condições de exposição nas duas faces da parede são também distintas, pelo que a sua instrumentação foi idêntica à da secção S2.

Na Fig. 6 apresenta-se uma vista das carotes instaladas na secção S2, localizada à cota de 230 m. Nesta figura estão assinaladas com um círculo as carotes instaladas pelo interior do pilar e com um quadrado as carotes exteriores.



Fig. 6 – Aspeto da localização das carotes instrumentadas na secção S2 (cota 230 m)

A instrumentação com sensores de resistividade, anteriormente descrita, foi complementada com a utilização de sensores *Rotronic* modelo *Hydroclip HC2-C05*, que permitem a medição direta dos dois parâmetros, humidade e temperatura, visando estabelecer correlação entre as medidas de resistividade elétrica do betão e a humidade nos mesmos locais durante o período de garantia da calibração dos sensores de humidade. Para este efeito foi instalado



um sensor em cada secção instrumentada no pilar, a uma distância de 5 cm da superfície, através da abertura de furos de pequeno diâmetro ($\phi = 6 \text{ mm}$), com a profundidade pretendida para a colocação do sensor, que depois foram devidamente tamponados. O tamponamento destes locais apresentou dificuldades acrescidas devido ao tipo de cabos com que são fornecidos os sensores.

5.4 Monitorização estrutural

A monitorização estrutural incluiu a medição de rotações no topo dos pilares e dos movimentos das juntas de dilatação, ambas através de equipamento amovível, e da monitorização da eventual ocorrência de fendas.

Para este efeito, foram instalados quatro *Crackmeter ITMSOIL Instruments*, modelo J2-1-50. Estes transdutores de corda vibrante com termistor incorporado possuem uma base de medida longa, com cerca de 40 cm. Foram instalados na superfície interior do betão do pilar, em faces opostas, nas secções S1 e S2, com uma orientação horizontal, minimizando a influência do carregamento, de forma a evidenciar o efeito que se pretende estudar (Fig. 7).

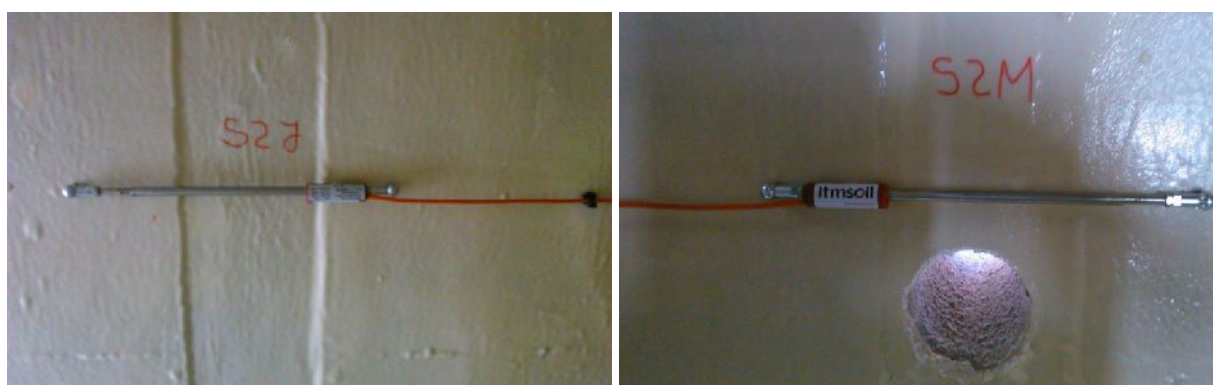


Fig. 7 – Aspeto da instalação dos transdutores de corda vibrante na secção S2

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A evolução do nível da albufeira do Escalão de Montante do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor, que se apresenta na Fig. 8, é da maior relevância para a interpretação dos resultados obtidos pelo sistema instalado nesta ponte, designadamente no que se refere à impermeabilização do betão. Na mesma figura estão assinaladas as cotas das três secções instrumentadas do pilar P3, permitindo constatar que o nível da albufeira atingiu o nível da secção S1 em março de 2015 e da secção S2 em janeiro de 2016.

A humidade relativa ambiente, medida com uma frequência horária, constitui o gráfico da esquerda da Fig. 9 (HR.amb), conjuntamente como os valores da humidade relativa medida



pelos três sensores de humidade e temperatura instalados no interior do betão nas três secções instrumentadas do pilar P3 - HR.1.1 (secção S1), HR.2.1 (S2) e HR.3.1 (S3). A mesma figura inclui um gráfico constituído pelos correspondentes valores da temperatura.

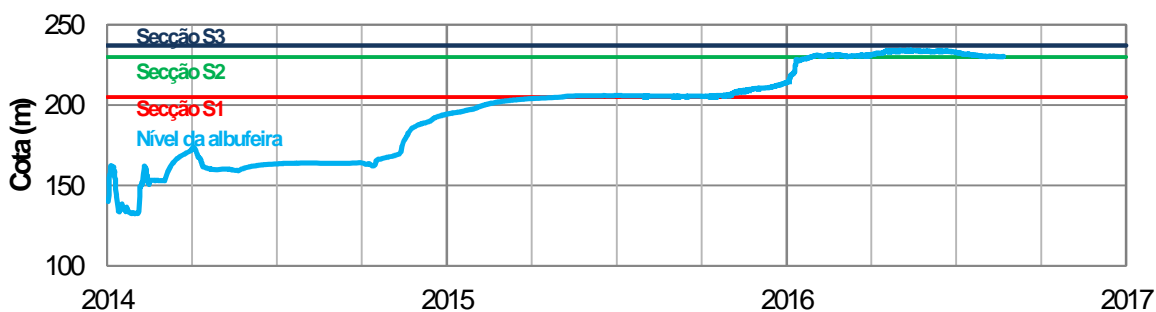


Fig. 8 – Evolução do nível da albufeira ao longo do tempo

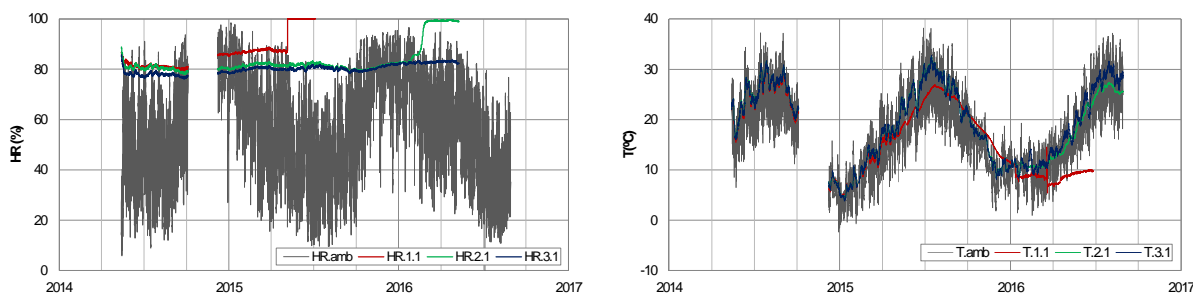


Fig. 9 – Evolução da humidade relativa e temperatura: valores ambientais e no interior do betão

A análise da Fig. 9 permite inferir a diminuta influência da HR ambiente nos valores medidos no interior do betão. Por outro lado, é evidente a correlação entre os valores de humidade medidos no interior do betão e o nível da albufeira, que se reflete, em particular, na subida brusca dos valores medidos pelos sensores instalados na secção S1 e S2 após a cota da albufeira atingir essas secções. Este aumento da HR atribui-se a uma possível perda de impermeabilização no local onde estão instaladas as sondas devido à dificuldade de impermeabilizar adequadamente os locais da passagem de cabos para este tipo de sondas.

Relativamente à temperatura, verifica-se uma evidente correlação entre os valores ambiente (T.amb) e os valores medidos no interior do betão (T.1.1, T.2.1 e T.3.1), que apresentam valores semelhantes entre si até o nível da albufeira atingir a secção S1 e, posteriormente, a secção S2. A partir da submersão destas secções a variação das respetivas temperaturas apresenta uma menor amplitude, naturalmente devida à inércia térmica da massa de água.

Os resultados das medidas de resistência elétrica do betão (R) obtidos nas carotes instrumentadas das secções S1 e S2 são apresentados na Fig. 10. De igual forma, os valores relativos à secção S3, permanentemente emersa, constituem a Fig. 11.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

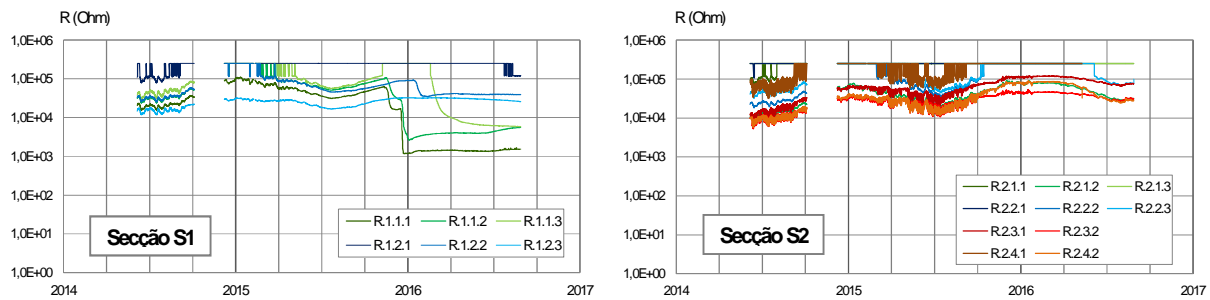


Fig. 10 – Evolução da resistência elétrica do betão: medidas nas secções S1 e S2

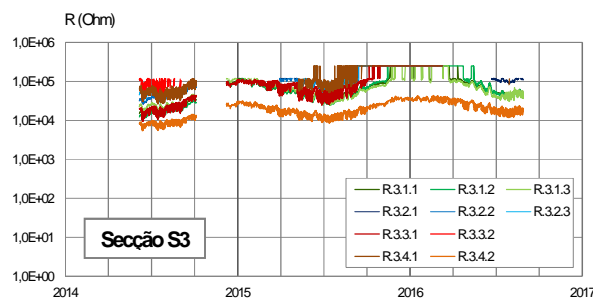


Fig. 11 – Evolução da resistência elétrica do betão: medidas na secção S3

A codificação utilizada na identificação das sondas foi a seguinte: *R* indica que se trata de um sensor de resistência elétrica, o primeiro algarismo refere-se à secção instrumentada (1 a 3), o segundo ao número da carote e o terceiro à profundidade de recobrimento (1 corresponde a 3 cm de recobrimento, 2 a 5 cm e 3 a 20 cm). Recordar-se que na secção S1 apenas foram extraídas carotes na face interior, enquanto nas restantes secções foram extraídas duas carotes pelo interior da parede do pilar e duas pelo exterior.

Todos os sensores colocados estão operacionais, tendo-se medido valores de *R* elevados, em geral superiores a 10 kOhm. Os resultados elevados estão truncados uma vez que o sistema de aquisição tem a sua capacidade limitada a valores de resistência de 250 kΩ.

Estes resultados mostram que não se verificaram diminuições significativas de resistência elétrica do betão que indiciem perda de eficiência do sistema de impermeabilização instalado, atribuindo-se as variações em todas as locais das secções S2 e S3 apenas a variações atribuíveis às variações de temperatura. Na secção S1, verificou-se, num dos locais instrumentados, a várias profundidades (R.1.1.1, R.1.1.2, R.1.1.3) uma ligeira diminuição de *R* no final de 2015, que coincidiu com o aumento do nível da albufeira, que, no entanto, se manteve estável em 2016 e superior a 1 kOhm, o que indicia não ter ocorrido perda relevante das características de impermeabilização do betão. Embora esta diminuição possa ser devida a uma eventual deficiência de impermeabilização da carote no decurso da instrumentação, esta situação continuará a ser acompanhada.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

7 CONCLUSÕES

A degradação do betão devido à ocorrência de reações expansivas internas constitui uma preocupação no âmbito da gestão de obras de arte, motivando a realização de estudos tendo em vista, para além da sua prevenção, a mitigação das suas consequências nas estruturas existentes. Neste contexto assume particular relevância o conhecimento da eficiência dos processos de mitigação utilizados, para o que importa desenvolver e validar adequados métodos de monitorização que permitam também conhecer as consequências estruturais decorrentes desses fenómenos.

Uma vez que o desenvolvimento destas reações expansivas é acelerado pela humidade e pela temperatura, a intervenção preventiva consistiu na impermeabilização do betão através de um revestimento protetor, pelo que o sistema de monitorização instalado visou a medição desses dois parâmetros no interior do betão.

Os sensores de HR e temperatura para embeber no betão carecem de calibrações de curto prazo e, em situações em que exista dificuldade de acesso para proceder à sua substituição, não são compatíveis com a morosidade dos processos em causa. Para além disso, em situações de imersão, podem ocorrer, como se verificou, dificuldades acrescidas na selagem das zonas de colocação dos sensores devido ao tipo de cabos utilizados. Para superar estas limitações, foi instalado um novo sistema de monitorização baseado na medição da resistividade elétrica do betão. Os resultados obtidos são promissores, tendo-se verificado que os sensores propostos têm sensibilidade para detetar pequenas variações do grau de saturação do betão, apresentam vantagens na selagem das zonas instrumentadas. Estudos laboratoriais acelerados estão a ser realizados visando o estudo da durabilidade dos sensores de resistência e de temperatura e humidade nestas condições particulares, bem como a correlação entre a resistência elétrica do betão e a humidade relativa.

É expectável que a continuação da monitorização com o sistema instalado permita tirar conclusões sobre a eficácia a longo prazo do sistema de impermeabilização. Estes resultados serão do maior interesse, tanto para esta ponte como para outras estruturas afetadas por reações expansivas do betão.

8 AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A, e à Infraestruturas de Portugal a autorização concedida para a apresentação deste trabalho.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

9 REFERÊNCIAS

- Appleton, J. & Costa, A. 2001. "Case Study: Duarte Pacheco Viaduct in Lisbon", Workshop on structure degradation by internal expansive reactions, Lisbon.
- Appleton, J. 2015. "Deterioration and repairing of concrete structures – case studies. International Conference on Recent Advances", Rehabilitation and Sustainability of Structures - RehabStructures 2015, Ponta Delgada, Azores, Portugal. ISBN 978-989-96264-9-2.
- Cruz, J. P. 2002. "N315 – Ponte sobre o rio Sabor", Betão Estrutural 2002. ISBN 972-9027-69-2.
- Cruz, J. P. 2004. "N315 – Ponte do rio Sabor. Curva sobre o vale", Engenharia e vida, Ano I, N°7.
- Grattan-Bellew, P.E., 1992. Alkali-silica Reaction - Canadian Experience, The Alkali-silica Reaction in Concrete, Swamy, R.N. Ed., Van Nostrand Reinhold, p. 30-53.
- Hobbs, D. W., 1988. Alkali-silica reaction in concrete, Thomas Telford Ltd., London.
- Idorn, G. M., 1989. "Alkali-silica reaction in retrospect and prospect", Proceedings of 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan, p.1-8.
- Pereira, E. 2004 "Monitorização da corrosão no betão armado", Tese de doutoramento, Univ. Lisboa.
- Salta, M.; Pereira, E., 1998. "Monitorização da corrosão em estruturas de betão armado", JPEE 98, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, LNEC, 25-28 Nov.
- Santos, J., 2005. "Desenvolvimento de um sensor de resistividade do betão para aplicação em estruturas", Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Silva, A. S., Gonçalves, A. & Salta, M.M. 2010. "Degradation of Concrete Bridges by Internal Expansive Reactions – Portuguese Case", 16th IRF World Meeting, Lisbon.
- Silva, A. S., Salta, M.M.; Melo, J.; Rodrigues, M.P. & Cristino, A.F. 2008. Research on the suppression expansion due to ASR. Effect of coatings and lithium nitrate, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway.