

# Degradação do betão por reacções álcalis-agregado: Exemplos de diagnóstico/prognóstico em pontes

António Santos Silva

*LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Lisboa,*

Dora Soares

*LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Lisboa,*

Lina Matos

*LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Lisboa,*

M. Manuela Salta

*LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Lisboa,*

**RESUMO:** A ocorrência, essencialmente na última década, de um grande número de estruturas de betão degradadas por reacções álcalis-agregado (RAA) em Portugal, motivou a necessidade de se avaliarem os métodos de caracterização da reactividade aos álcalis de agregados para betão, bem como os métodos de diagnóstico e de prognóstico da reacção em estruturas de betão afectadas.

As RAA são reacções químicas que se desenvolvem entre os constituintes reactivos dos agregados e os iões alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial do betão, originando um gel higroscópico alcalino que absorve água e expande. Esta expansão origina tensões internas que podem provocar a fissuração do betão, favorecendo significativamente outros processos de deterioração, tais como no caso do betão armado, a corrosão das armaduras.

O aumento do número de estruturas afectadas por RAA no nosso País, em particular pela RAS (reacção álcalis-sílica), tem sido resultado de uma maior consciencialização do meio técnico nacional para este tipo de degradação de estruturas de betão, bem como da melhoria dos métodos de caracterização utilizados para o seu diagnóstico.

Este trabalho tem como objectivo apresentar exemplos de recentes estudos de diagnóstico/prognóstico, efectuados no LNEC, de obras de arte afectadas por RAA em Portugal, ilustrando a metodologia de caracterização empregue.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente número de casos de estruturas afectadas em Portugal por reacções álcalis-agregado (RAA), obriga à necessidade da revisão e actualização de recomendações preventivas destinadas a evitar a ocorrência da RAA em novas construções.

As RAA são reacções químicas que se desenvolvem entre os constituintes reactivos dos agregados e os iões alcalinos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) presentes na solução intersticial do betão. Se estas reacções podem ser em geral benéficas nas argamassas antigas, no betão têm consequências muito nefastas dado que são reacções expansivas. Em particular, as reacções álcalis-sílica (RAS) que envolvem rochas e minerais que contêm formas de sílica reactiva, sendo consideradas

actualmente como a causa mais relevante de deterioração precoce de um número cada vez maior de estruturas de betão [Santos Silva, 2005].

Os principais sintomas indicativos da presença de RAS são a expansão e a fissuração do betão. Este processo pode também favorecer significativamente outros processos de deterioração, nomeadamente, no caso do betão armado, a corrosão das armaduras.

As RAA encontram-se identificadas desde 1940, mas só na década de 80 é que foi identificada a RAS numa estrutura de betão em Portugal, a barragem de Pracana [Silva, 1992]. No entanto, só em meados dos anos 90, com a descoberta do caso do Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa [Braga Reis et al., 1993], é que o meio técnico nacional tomou maior conhecimento desta patologia no betão.

Actualmente, existem já algumas dezenas de estruturas recenseadas como estando afectadas por RAS em Portugal, sendo previsível que este número venha a aumentar rapidamente face aos condicionalismos geológicos nacionais.

A necessidade de se ter um diagnóstico correcto das causas de degradação de uma estrutura de betão é determinante, nomeadamente, na escolha do método de reparação a empregar. Alguns casos conhecidos de insucesso na opção por um determinado método de reparação vieram a ser justificados por um incorrecto ou incompleto diagnóstico. Neste caso particular, um aspecto que dificulta o diagnóstico da RAS é também a sua semelhança em termos macroscópicos com outra reacção expansiva de origem interna, a reacção sulfática de interna (RSI), a qual também já foi diagnosticada em algumas estruturas de betão portuguesas, apesar de ser mais recente e com poucos casos ainda recenseados (Santos Silva et al., 2008).

Esta comunicação visa apresentar os mais recentes desenvolvimentos em termos de metodologias do diagnóstico e prognóstico da RAS, ilustrando alguns casos práticos onde a mesma foi aplicada.

## 2 METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO

Os estudos de diagnóstico e prognóstico da RAS em estruturas de betão têm como principal objectivo determinar a origem da degradação, se é ou não causada por esta reacção, a sua extensão e distribuição na estrutura, e o prognóstico da sua evolução futura em termos da funcionalidade da estrutura.

A obtenção de informações sobre o estado do betão numa estrutura degradada e um diagnóstico correcto das causas da sua deterioração poderá contribuir para uma definição atempada dos procedimentos de manutenção/reparação mais adequados e para a adopção de medidas preventivas de minimização dos riscos do prosseguimento das reacções expansivas [Santos Silva e Braga Reis, 2000].

O principal sintoma nas estruturas associado à deterioração do betão por RAS é a fissuração à superfície do betão, a qual estará mais ou menos pronunciada conforme o grau de humidade existente no betão. A medida da abertura das fissuras é variável, de acordo com o grau de extensão das reacções, podendo atingir nalguns casos a ordem de alguns milímetros. A profundidade de fissuração pode ser apreciável, chegando mesmo nalguns casos a atravessar na totalidade o elemento afectado.

O tipo de fissuração presente está também relacionado com o tipo de estrutura. No betão não armado essa fissuração encontra-se geralmente distribuída de forma aleatória, constituindo uma rede de fissuração designada por “map-cracking”. No betão armado, as forças expansivas internas encontram-se restringidas pelas armaduras, o que origina uma fissuração que pode estar direccionada segundo uma ou duas direcções, como ilustrado na ‘Figura 1’.

Apesar da fissuração multidireccional ser um dos principais indícios da presença de RAS na estrutura, este sintoma é similar ao manifestado por outra reacção expansiva – a RSI (reacção sulfática interna).



(a)



(b)

Figura 1. (a) Pormenores da fissuração tipo “map-cracking” no topo do maciço do pilar de uma ponte; (b) Fissuração orientada segundo as armaduras principais num pilar de uma ponte.

Outros sinais, em conjunto com o referido podem advertir para a ocorrência de RAS, nomeadamente, o fecho de juntas de dilatação, a existência de uma flecha importante, o empolamento diferencial do betão em torno de uma fissura, ruptura de armaduras, desagregação do betão, coloração dos paramentos, presença de pequenas crateras (“pop-outs”) onde é visível a superfície de um agregado ou um produto esbranquiçado, e aparecimento de exsudações ao longo das fissuras [LCPC, 1999; Santos Silva e Braga Reis, 2000].

Todas as informações relacionadas com a construção da estrutura são importantes e devem ser obtidas, nomeadamente a data de construção, diagramas com a localização e tipo de armaduras, composição do betão, origem dos materiais, relatórios de anteriores inspecções ou intervenções, e particularmente as datas referentes ao aparecimento dos primeiros sinais de degradação [RILEM TC-191 ARP, 2003].

Se a observação visual do betão fizer suspeitar da ocorrência de RAS, a metodologia a seguir para confirmar esse diagnóstico preliminar baseia-se numa avaliação que tem em conta, simultaneamente, aspectos microscópicos, próprios do material, e macroscópicos, ligados ao tipo de estrutura e ao grau de exposição (ciclos humedificação-secagem, imersão permanente, etc.). É constituída por várias fases, incluindo recolha de informações sobre os constituintes do betão, extracção de amostras em várias zonas da estrutura e realização de ensaios em laboratório.

Os ensaios em laboratório realizados sobre carotes de betão retiradas da estrutura constituem a base indispensável do diagnóstico. Um exemplo dos ensaios que se podem realizar é apresentado na ‘Figura 2’. Para tal, é necessário retirar carotes em zonas alteradas e em zonas sãs. Dessa forma é possível dispor de um ponto de referência que possibilite a compreensão da ocorrência do fenómeno em determinadas zonas da estrutura. Por outro lado, é possível que numa zona aparentemente sã a reacção já esteja presente o que possibilita que se possa intervir preventivamente.

O número de amostras necessário está directamente dependente do tipo e complexidade da estrutura, devendo normalmente seleccionar-se 3 zonas em cada estrutura (laje, pilar, fundação, etc.) representativas de betão são, moderadamente degradado e bastante degradado, e de cada zona retirar-se pelo menos uma carote. As amostras devem ter um diâmetro da ordem do dobro da dimensão máxima do agregado (em geral entre 100 e 150 mm) e um comprimento que possibilite atingir a zona onde a temperatura máxima do betão, ou do elemento em análise, tenha sido atingida, o que pode significar alguns metros. Depois de extraídas, as carotes devem de imediato ser protegidas em sacos plásticos fechados, de forma a prevenir a secagem e carbonatação.

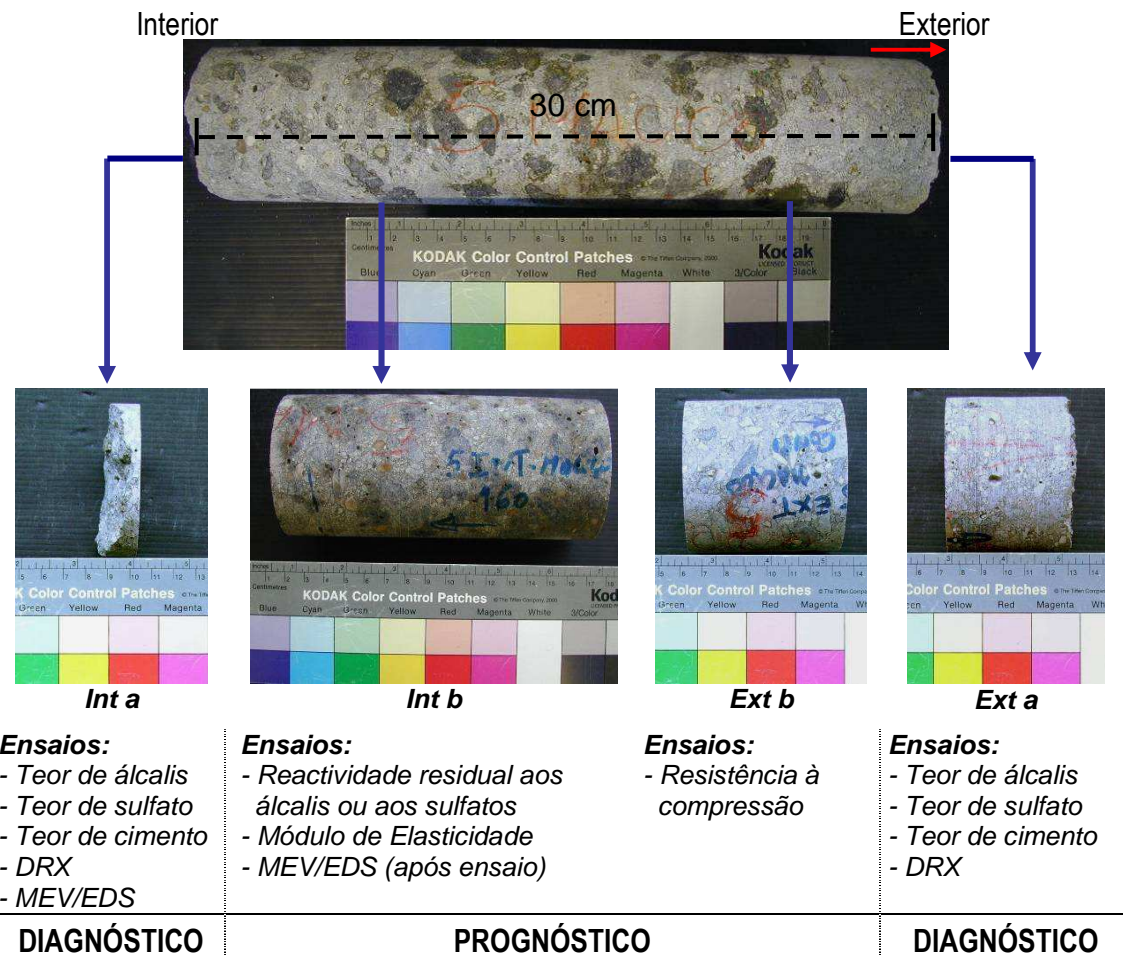


Figura 2. Principais métodos usados no diagnóstico/prognóstico da RAS em estruturas de betão.

A microscopia, quer a óptica (MO) como a electrónica de varrimento (MEV), é a metodologia mais segura para confirmar a presença da RAS e o seu grau de desenvolvimento, tal como é apresentado na 'Figura 3'. A par desta técnica, a difracção de raios X permite fazer a análise mineralógica do betão e dos seus constituintes e identificar a presença de possíveis produtos de reacções expansivas.

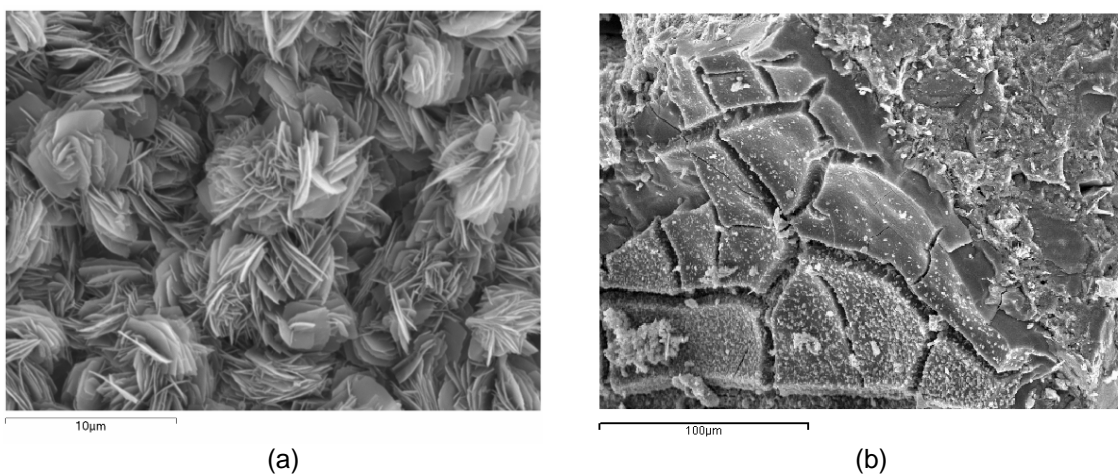


Figura 3. Aspectos ao MEV de (a) produtos cristalizados da RAS; e (b) gel de RAS em interface agregado/pasta.

Além destas técnicas, é também útil proceder-se à determinação do teor de cimento do betão com o intuito de identificar variações de composição do betão entre as diferentes zonas analisadas, bem como para relacionar a anomalia verificada com a eventual elevação excessiva de temperatura durante a hidratação do cimento.

Também a caracterização química do betão, nomeadamente em termos dos teores de álcalis e sulfatos, dá-nos informação sobre a origem (interna ou externa) destes compostos, e permite complementar os ensaios de reactividade residual aos álcalis e aos sulfatos existentes no betão. Este ensaio constitui um elemento de diagnóstico da RAS, bem como de prognóstico sobre a possível evolução futura da RAS no elemento de betão do qual foi extraída a carote na estrutura. Nesta etapa a microscopia é também uma excelente ferramenta, permitindo além do diagnóstico inicial, fazer também um prognóstico relativamente à evolução da reacção em betões sujeitos aos ensaios de reactividade residual aos álcalis e/ou sulfatos.

Alguns ensaios físicos de carotes de betão, como ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade podem complementar essa informação de prognóstico.

Feito o diagnóstico e prognóstico da ocorrência de RAS numa determinada estrutura, a gestão futura desta deverá preferencialmente englobar a instalação dum sistema de observação adequado para se avaliar a evolução das reacções, nomeadamente através do acompanhamento da evolução da fissuração ou por medida regular das deformações globais da estrutura [Santos Silva e Braga Reis, 2000]. Um procedimento deste tipo é seguido já em Portugal para algumas barragens [Ramos et al., 1996].

### 3 ESTUDO DE CASOS

Os casos de estudo que se vão apresentar foram estudados pelo LNEC e por razões de confidencialidade vão ser referenciados por uma letra. Trata-se de três pontes em que as degradações ocorridas afectavam essencialmente as partes mais maciças da estrutura e em contacto com a água.

#### 3.1 Ponte A

Ponte de betão armado construída entre 1994 e 1997, situada na região Norte de Portugal. Na confecção do betão foram utilizados agregados graníticos da região com uma forte dosagem de cimento ( $> 400 \text{ kg/m}^3$ ).

Após 10 anos em serviço foi detectada a presença de fissuras em alguns dos pilares e seus maciços, apresentando um padrão que fez suspeitar da ocorrência de reacções expansivas internas, tal como se pode ver na 'Figura 4'.

Os ensaios de diagnóstico vieram mostrar a presença de RAS, devido ao emprego de agregados graníticos reactivos aos álcalis. Foi também detectada a presença de RSI que terá estado associada uma vez mais à forte dosagem de ligante e há grande espessura das peças de betão afectadas.

Os teores determinados de álcalis e de sulfatos no betão, confirmaram que existem em quantidade suficiente para a continuação do desenvolvimento de reacções expansivas internas, quer em termos da RAS como da RSI.

Os ensaios de prognóstico da RAS corroboraram os resultados diagnosticados, mostrando existir ainda no betão reactividade residual moderada aos álcalis.

Em termos médios os valores de expansão residual obtidos para as carotes dos maciços dos pilares são superiores aos das carotes retiradas no próprio pilar. Este dado está de acordo com os resultados da análise microestrutural (petrografia e MEV/EDS) que indicaram uma maior reactividade aos álcalis para o granito empregue



no betão dos maciços (granito de grão fino de duas micas) do que para o granito usado nos pilares (granito muscovítico de grão fino).

De referir ainda que os maiores valores de expansibilidade residual foram obtidos para carotes retiradas no maciço do lado Norte, o que pode estar associado à menor exposição à humidade dessa zona, o que terá atrasado o desenvolvimento da reacção, pois, como se sabe, a presença de humidade favorece a RAS [Wigum et al., 2006].

De salientar que a combinação da RAS com a RSI é muito comum e resulta da instabilidade que a etringite primária apresenta, isto é aquela que resulta da hidratação normal do cimento, em betões com teor de álcalis elevado. Nessas condições os iões sulfato não se combinam e ficam disponíveis na solução intersticial do betão, podendo em determinadas condições vir a precipitar como etringite retardada.

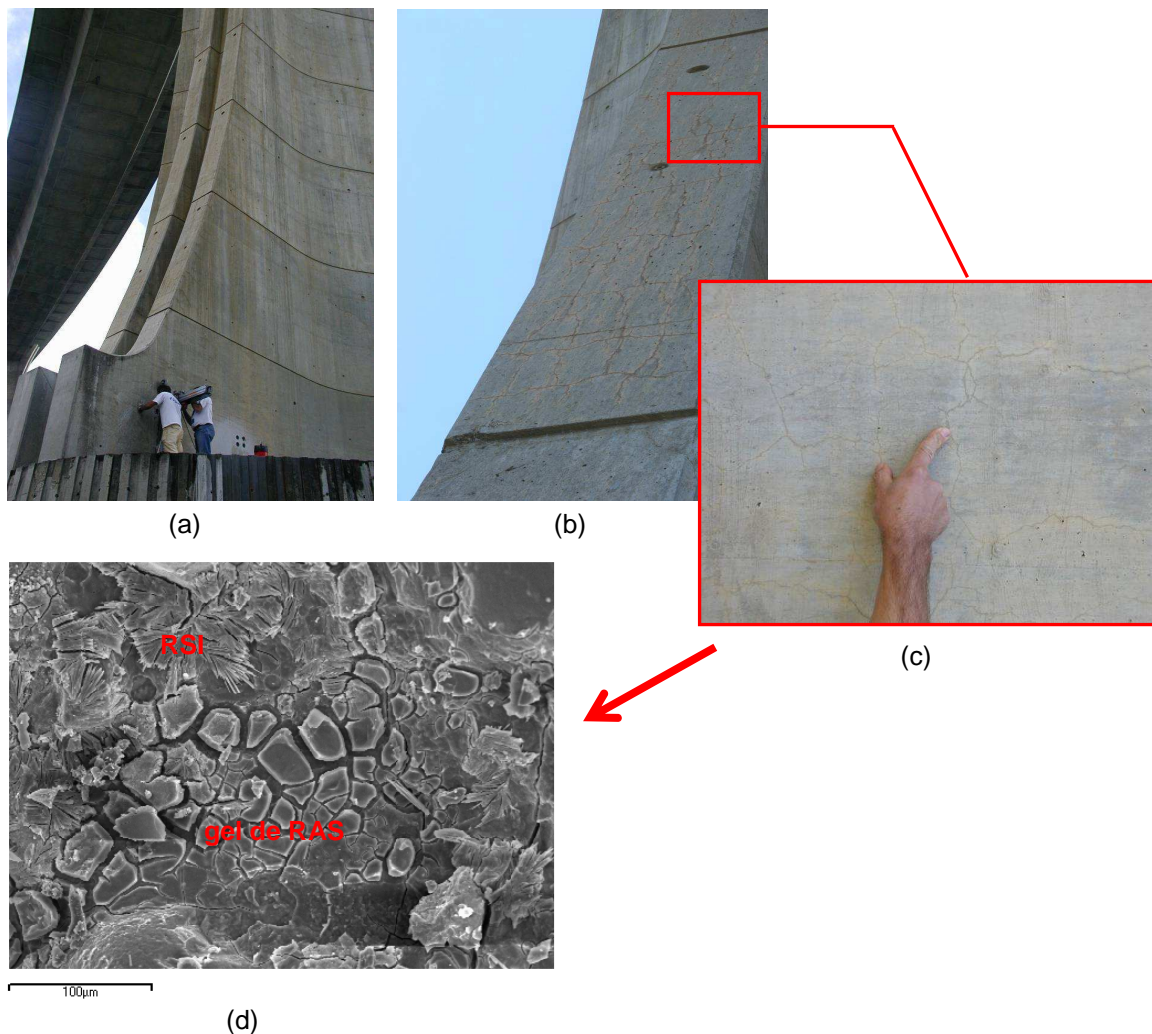


Figura 4. (a) Extracção de carotes num pilar em zonas com e sem fissuração do betão; (b) zona do pilar com fissuração evidenciada; (c) pormenor da fissuração nas nervuras do pilar; (d) identificação de gel de RAS e DEF na zona fissurada.

### 3.2 Ponte B

Ponte de betão armado construída em finais dos anos 70, localizada na região Centro de Portugal. A fim de avaliar diferentes zonas da estrutura, uma vez que é frequente possuírem composição diferente, foram retiradas amostras a 3 cotas distintas dos pilares, respectivamente na zona junto ao terreno, a meia altura do pilar e próximo do tabuleiro, zonas que foram designadas por Água, Meio e Alto. Foram

também retiradas amostras do próprio tabuleiro, tal como se exemplifica nas 'Figuras 5 e 6'.

Na inspecção foi detectada a existência de fissuração aparentemente de origem estrutural e também fissuras com distribuição aleatória, tipo craquelé, que é o padrão de fissuração típico das reacções expansivas de origem interna. Esta fissuração aleatória ocorre em várias zonas da estrutura, embora com maior desenvolvimento nas zonas mais expostas ou com problemas de drenagem (ex: capitéis dos pilares), zonas próximas da água do rio (ex: pilares) ou mesmo em contacto directo (ex: pilares e embasamentos).

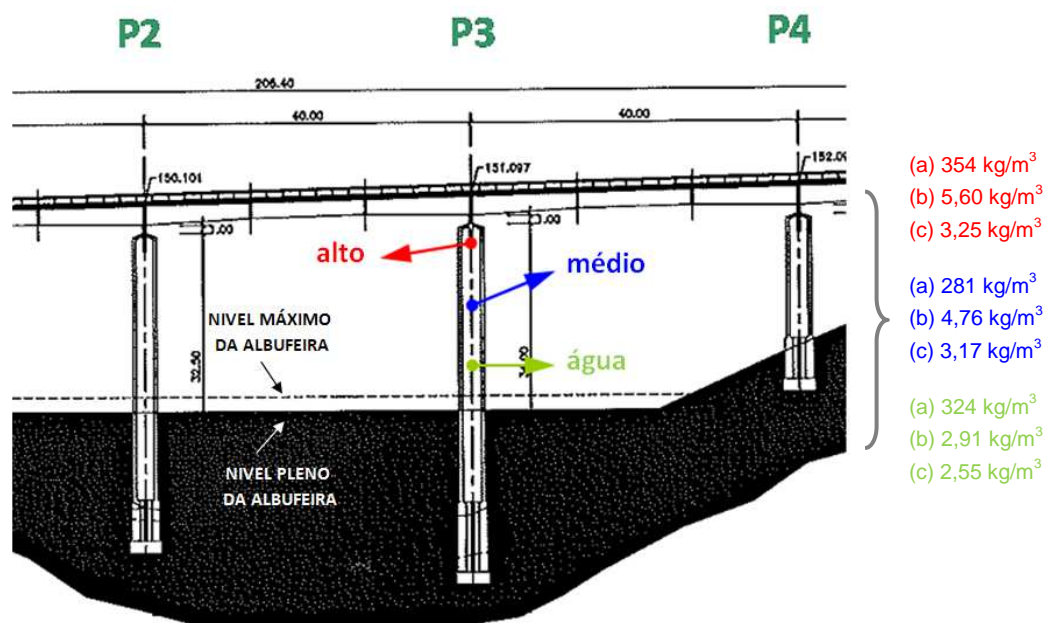


Figura 5. Esquema dos pilares da ponte (corte longitudinal) de onde foram retiradas as amostras, com os respectivos resultados de: (a) teor de cimento, (b) Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>, e (c) SO<sub>3</sub> determinados.

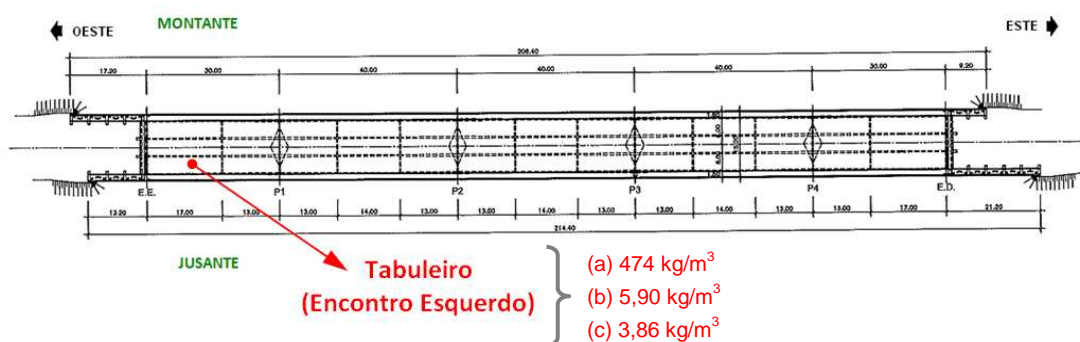


Figura 6. Esquema dos tabuleiro da ponte (planta geral) de onde foram retiradas as amostras, com os respectivos resultados de: (a) teor de cimento, (b) Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>, e (c) SO<sub>3</sub> determinados.

Os resultados de diagnóstico mostram um betão com dosagens variáveis entre as várias zonas, sendo o betão do tabuleiro mais rico em cimento do que o dos pilares. Este resultados está em concordância com os resultados da análise petrográfica, na qual se verificou maior quantidade de clínquer na carote extraída do tabuleiro, comparativamente às carotes dos pilares. De notar ainda que os valores mais elevados de sulfatos foram obtidos também para estas duas zonas. Com base nestes resultados não é expectável, à excepção do tabuleiro e eventualmente na zona alta do

Pilar P3, a ocorrência de RSI nesta ponte. Neste caso, se o betão destas duas zonas estiver estado sujeito a temperaturas elevadas durante a hidratação do cimento e a humidade elevada, pode ter desenvolvido RSI. De salientar que no tabuleiro o provete que apresentou o maior valor de expansão residual aos sulfatos provém de uma zona mais interior do betão, portanto aquela que esteve sujeita a maior temperatura durante as primeiras idades do betão.

Relativamente aos teores de álcalis solúveis no betão verificou-se que estão bastante acima do valor aconselhado [LNEC E 461, 2007], para o caso da utilização de agregados reactivos aos álcalis. Assim, uma vez que foram empregues agregados quartzíticos reactivos aos álcalis, estão reunidas condições suficientes para continuar a RAS.

Apesar de haver potencial para a ocorrência de reacções expansivas, apenas se observaram ao microscópio alguns produtos RAS num dos pilares, não sendo observado qualquer indício de ocorrência de RSI no betão.

Quanto aos ensaios de reactividade residual aos álcalis e aos sulfatos, verificou-se, em termos médios, uma reactividade residual média, ou seja, com moderado potencial expansivo futuro para esta estrutura.

### 3.3 Ponte C

Ponte de betão armado construída também no final dos anos 70, e situada na região Centro de Portugal. Com excepção dos pilares extremos, os restantes pilares encontram-se dentro de água, em alguns casos imersos várias dezenas de metros. Também neste caso foi decidido retirar amostras a 3 cotas distintas, respectivamente na zona junto ao terreno, a meia altura do pilar e próximo do tabuleiro, zonas que foram designadas por Água, Meio e Alto.

A fissuração que foi detectada atinge sobretudo os pilares e seus maciços dentro de água. Este é um factor de extrema importância, pois como se sabe, a par da elevada alcalinidade do betão, a presença de humidade frequente ou a realização de ciclos de molhagem-secagem, é um dos factores que mais contribui para o mecanismo acelerador da RAS. A simples observação macroscópica de carotes extraídas nas zonas mais fissuradas da estrutura permitiu logo confirmar a suspeita de que o betão se encontraria afectado por reacções expansivas internas, uma vez que eram evidentes produtos brancos a preencher poros e interfaces agregado-pasta, tal como se pode ver na 'Figura 7'.



(a)



(b)

Figura 7. (a) Pormenor do padrão de fissuração num pilar com medição da dimensão das fissuras; (b) Pormenor de uma carote retirada de um pilar da ponte em que são visíveis poros, fissuras e interfaces preenchidas por material com aspecto de gel RAS. De notar ainda a ocorrência de orlas de alteração em torno de alguns agregados siliciosos.



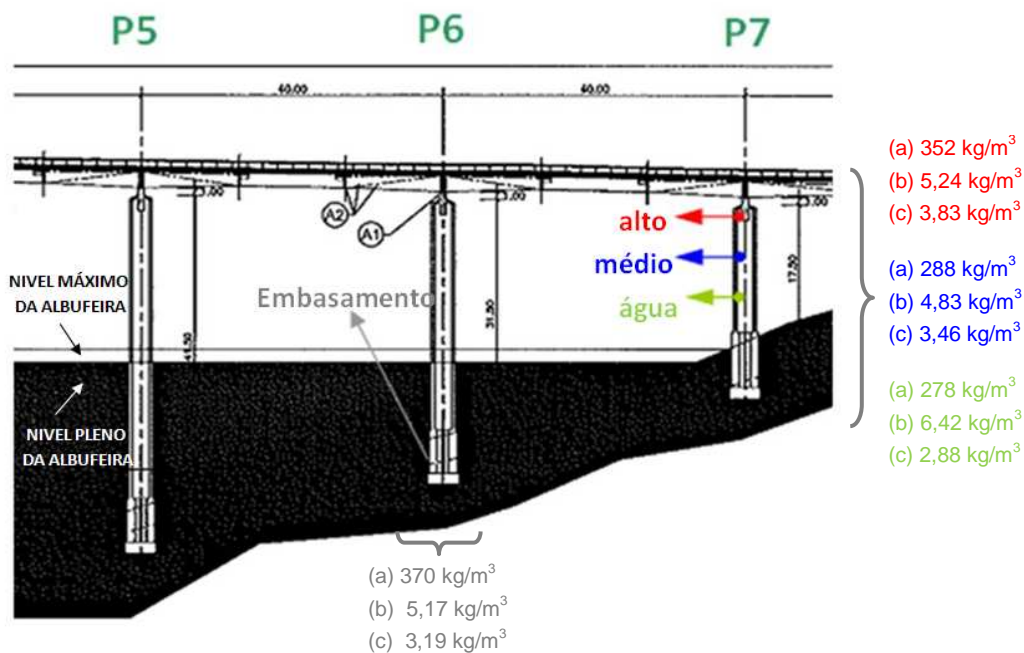


Figura 8. Esquema dos pilares da ponte (corte longitudinal) de onde foram retiradas as amostras, com os respectivos resultados de: (a) teor de cimento, (b) Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>, e (c) SO<sub>3</sub> determinados.

Os ensaios de diagnóstico vieram confirmar a presença de RAS, devido ao emprego de agregados quartzíticos reactivos aos álcalis. Além disso, foi também detectada a presença de DEF.

As maiores dosagens de cimento foram obtidas nas carotes do Embasamento do Pilar P6 e na zona alta do Pilar P7, zonas essas, que também apresentam elevados teores de sulfatos, acima do limite especificado [LNEC E 461, 2007] apresentando assim um maior risco de ocorrência de RSI, caso o betão tenha sofrido temperaturas elevadas durante a hidratação do cimento e tenha estado, como foi o caso, sujeito a humidade elevada.

Os teores de álcalis solúveis medidos no betão estão, em geral, bastante acima do valor aconselhado [LNEC E 461, 2007] para o caso da utilização de agregados reactivos aos álcalis, sendo portanto suficientes para na presença de agregados reactivos desencadear a RAS.

Com base nos ensaios de prognóstico pode considerar-se que nas carotes ensaiadas o betão apresenta uma reactividade residual aos álcalis e aos sulfatos que pode ser classificada de elevada na zona do Embasamento do Pilar P6 e de média a baixa para as restantes zonas da estrutura.

#### 4 CONCLUSÕES

As reacções expansivas internas são um problema que afectam a durabilidade de estruturas de betão, manifestando-se cada vez mais frequentemente no nosso país. Desta forma torna-se cada vez mais importante adoptar metodologias apropriadas de diagnóstico e prognóstico.

Durante a observação de uma estrutura a evidência de fissuração é o principal sintoma associado à RAS, no entanto, esta manifestação exterior é idêntica à apresentada pela RSI.

Neste artigo apresenta-se uma metodologia de diagnóstico e prognóstico que permite não só explicar as origens, como as causas responsáveis para as degradações observadas na estrutura. Por outro lado, possibilita ainda a determinação da evolução do fenómeno e das suas consequências para a estrutura. Os casos de

estudo apresentados comprovam que esta patologia afecta essencialmente betões onde foram utilizados agregados reactivos aos álcalis, que estejam sujeitos à presença de humidade frequente ou permanente, e em ambiente de elevada alcalinidade.

Actualmente, já se sabe que uma medida mitigadora da RAS passa pela utilização de adições minerais do tipo II em substituição de uma parte do cimento e em quantidade suficiente para actuarem com eficiência. Estas adições consomem hidróxido de cálcio por via da reacção pozolânica, diminuindo assim a quantidade de iões hidroxilo livres para reagir e formar geles silico-alcalinos expansivos.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito dos projectos EXREACT (Mitigação de reacções deletérias expansivas internas em estruturas de betão, PTDC/CTM/65243/2006) e IMPROVE (Melhoria do desempenho de agregados para a inibição das reacções álcalis-agregado no betão, PTDC/ECM/115486/2009). Os autores agradecem ainda o apoio no âmbito do projecto DURATINET (Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Área Network) do Programa Operacional Espaço Atlântico 2007-2013, co-financiado pelo FEDER.

## 5 REFERÊNCIAS

- Braga Reis, M. O., Salta, M.M., Eustáquio, E.M., Santos Silva, A., 1993, “Estudo das causas de degradação do betão do Viaduto Duarte Pacheco”, Nota Técnica LNEC, Lisboa.
- LCPC, 1999, “Manuel d’identification des réactions de dé gradation interne du béton dans les ouvrages d’art”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, p. 42.
- LNEC E 461, 2007, “Betão. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas”, Especificação LNEC, Lisboa, p. 7.
- Ramos, J.M., Batista, A.L., Oliveira, S.B., Castro, A.T., Silva, H.S., Pinho, J.S., 1996, “Reliability of Arch Dams Subject to Concrete Swelling – Three cases histories”, Memória LNEC nº 808, p. 19.
- RILEM TC 191-ARP, 2003, “Guide to diagnosis and prognosis of AAR damage to concrete in structures”, Alkali-Reactivity & Prevention. Assessment, Specification and Diagnosis, RILEM, First Draft AAR-6, p. 66.
- Santos Silva, A., Gonçalves, A.F., Pipa, M., 2008, “Diagnosis and prognosis of Portuguese concrete railway sleepers degradation – a combination of ASR and DEF”, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 1240-1249.
- Santos Silva, A., 2005, “Degradação do betão por reacções álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para sua prevenção”, PhD Thesis, Universidade do Minho-LNEC, Guimarães.
- Santos Silva, A., Braga Reis, M.O., 2000, “ Metodologia de diagnóstico da ocorrência de reacções expansivas de origem interna em estruturas de betão”; Actas do Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, Lisboa, p. 335-344.
- Silva, H.S., 1992, “Estudo do envelhecimento de barragens de betão e de alvenaria. Alteração física e química dos materiais”, Relatório de Tese, LNEC, p. 385.
- Wigum, B.J., Pedersen, L.T., Grelk, B., Lindgård, J., 2006, PARTNER Report 2.1. State of the-art report: Key parameters influencing the alkali aggregate reaction, SINTEF, Trondheim, p. 73.