

Identificación de puentes afectados por reacciones árido-álcali. Estrategias de actuación

Identification of aggregate-alkali affected bridges. Intervention strategies

Gonzalo ARIAS HOFMAN^a, José OLIVAS RUIZ^b, Ignacio CASTRO GALLARDO^c, Andrés F. BONILLA MIELES^d, Abelardo DE LA PARRA DÍAZ^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INES Ingenieros Consultores. Director de Sistemas. gah@inesingenieros.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INES Ingenieros Consultores. Jefe de Proyecto. jor@inesingenieros.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INES Ingenieros Consultores. Ingeniero de Proyecto. icg@inesingenieros.com

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INES Ingenieros Consultores. Ingeniero de Proyecto. afbm@inesingenieros.com

^e Licenciado. Ciencias Ambientales. INES Ingenieros Consultores. Ingeniero de Proyecto. apd@inesingenieros.com

RESUMEN

En los últimos diez años, ciertas regiones de España han experimentado un aumento en los casos de puentes de hormigón que requieren demolición o intervenciones significativas debido a una causa común: las reacciones árido-álcali en el material base (hormigón). Estas reacciones provocan, a su vez, fenómenos derivados como la corrosión y la rotura de las armaduras, tanto activas como pasivas. Este artículo presenta una estrategia integral para la identificación de estos casos, su caracterización y la propuesta de diferentes acciones correctivas para abordarlos.

ABSTRACT

Over the past ten years, certain regions of Spain have witnessed an increase in cases of concrete bridges that require demolition or significant interventions due to a common cause: alkali-aggregate reactions in the base material (concrete). These reactions lead to subsequent issues such as corrosion and rupture of both active and passive reinforcements. This article presents a comprehensive strategy for identifying these cases, characterizing them, and proposing various corrective actions to address them.

PALABRAS CLAVE: árido-álcali, deformación, fisuras, módulo de elasticidad, impermeabilización.

KEYWORDS: aggregate-alkali, deformation, cracks, modulus of elasticity, waterproofing.

1. Introducción

En los últimos años, se ha incrementado la intervención en puentes de hormigón debido a una patología común que, si no se detecta a tiempo, puede llevar a la demolición de la estructura tras alcanzar un estado irreversible. Estos puentes, de tipología similar (losas aligeradas de hormigón postesado ejecutadas in situ), tienen una antigüedad variable, pero en su

mayoría superan los 15 años. La principal patología que afecta a estas estructuras es el proceso expansivo relacionado con las reacciones árido-álcali (AAR por sus siglas en inglés: Alkali-Aggregate Reaction) [1].

Hasta hace poco, los síntomas de este fenómeno pasaban desapercibidos o no eran identificados por los inspectores de puentes, lo

que constituye uno de los principales motivos para la redacción de este artículo: la divulgación y explicación de los aspectos visuales que permiten la identificación temprana de los casos potenciales, antes de que lleguen a un punto irreversible.

Además de proporcionar criterios para la selección inicial de puentes, se presentará una descripción de los ensayos que pueden llevarse a cabo de manera progresiva, a medida que se vayan confirmando o descartando los problemas asociados con la reacción árido-álcali en el hormigón.

No en todos los casos, pero sí en la mayoría, se puede llegar a actuar sobre el puente, reduciendo la evolución de las patologías y prolongando de facto la vida útil de estos puentes.



Figura 1. Vista general del puente tipo en el que se identifica con mayor frecuencia la patología descrita.

En el presente artículo no se va a realizar una explicación del proceso árido-álcali, ya que está abundantemente tratado en la bibliografía científica ([3]). Únicamente se recuerda de forma resumida que para que se desarrollen estos procesos deben coincidir tres elementos: áridos reactivos, álcalis y agua. Cuando estos componentes entran en contacto, reaccionan generando un gel expansivo que provoca tensiones tanto en los áridos como en la pasta de cemento, lo que favorece la aparición de fisuras en el material.

2. Identificación de casos

Los numerosos casos en los que han podido participar los autores de este artículo permiten establecer unos patrones de daños que se repiten en la mayor parte de ellos, aunque se manifieste con diferente intensidad. A continuación, se describen dichos patrones:

2.1 Identificación visual

Se trata de la tarea en la que, en la actualidad, es necesario mejorar la calidad de las inspecciones de puentes, a través de un conocimiento más profundo de la problemática. Por una parte, se debe entender que este tipo de reacciones no afecta a cualquier tipología de puente, sino que se manifiesta en unas tipologías específicas. En segundo lugar, es importante identificar las regiones o zonas donde con mayor frecuencia se localizan los casos más graves. Finalmente, deben reconocerse los signos externos que permiten al inspector identificar una posible reacción que, de no ser controlada, podría derivar en la demolición del puente.

2.1.1. Tipología de puentes

El problema se manifiesta con mayor frecuencia en puentes de losa aligerada de hormigón postesado, ejecutados in situ. Esto no quiere decir que no se pueda desarrollar en otro tipo de puentes de hormigón, por ejemplo, en marcos de hormigón armado ejecutados in situ; sin embargo, en estos casos, la gravedad de los daños suele ser considerablemente menor. Se insiste en que la voluntad de este artículo es que los casos más graves no se califiquen de forma equivocada en una inspección visual, más allá de que algún caso aislado con menor intensidad pueda pasar desapercibido.

2.1.2. Localización

La meseta castellana y, en particular, las provincias de Toledo, Madrid y Valladolid son las zonas donde más casos se han identificado. La razón es muy simple, algunas de las canteras

de estas regiones ofrecen áridos reactivos, que corresponden a uno de los tres ingredientes necesarios para que se produzca la reacción árido-álcali.



Figura 2. Localización de los casos documentados por los autores.

Este análisis se basa en el conocimiento que tienen los autores de este artículo por sus experiencias de los últimos 15 años en estas provincias y en muchas otras, pero no se ha realizado un estudio exhaustivo del territorio español que permita proponer un mapa de zonas de canteras potenciales suministradoras de áridos reactivos.

El tipo de árido reactivo suele ser en la mayoría de los casos árido silíceo, por lo que la reacción también es conocida como reacción álcali-sílice (ASR por sus siglas en inglés: Alkali-Silica Reaction). Por otro lado, la reacción álcali-carbonato (ACR por sus siglas en inglés: Alkali-Carbonate Reaction) es menos frecuente. Los áridos más reactivos son calcedonia, ópalo, pedernal poroso y areniscas impuras. Los álcalis son fundamentalmente óxido de sodio y potasio del cemento.

2.1.3. Signos visibles

Los signos más evidentes son dos:

- Fisuras longitudinales, numerosas y con cierta equidistancia, de abertura variable usualmente entre 0,4 y 2 mm, visibles incluso a cierta distancia en cara inferior y almas de la losa.



Figura 3. Fisuras longitudinales bajo tablero.

- Grietas longitudinales en cara superior de la losa, normalmente escasas en número, pero de gran abertura mayor o igual a 5 mm, y ocultas bajo el pavimento o aceras. Solo en operaciones de renovación del firme quedan visibles.

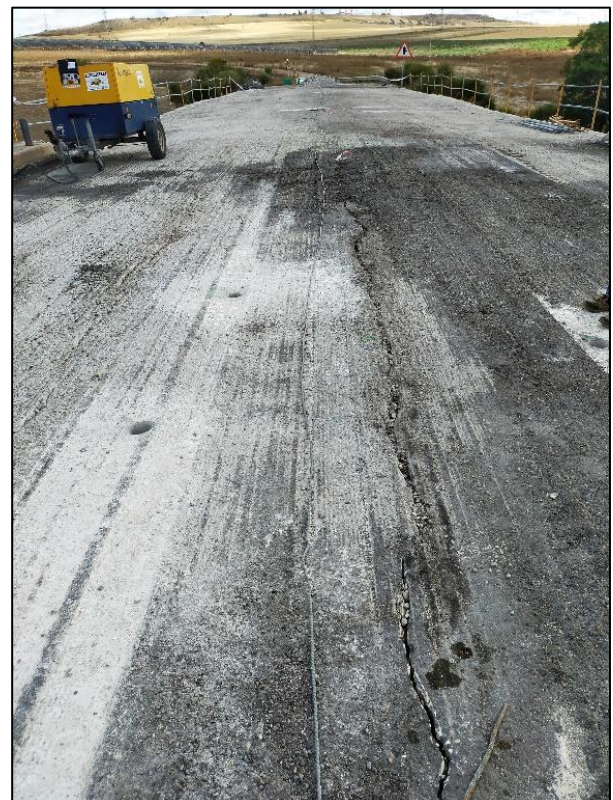


Figura 4. Grieta longitudinal sobre tablero.

La orientación de las fisuras o grietas, que se explica por la compresión a la que está sometida la losa debido al sistema de postesado, puede generar confusión en el inspector de puentes, quien a menudo las atribuye a la falta de recubrimiento o

a la corrosión de las armaduras, es decir, a un problema de corrosión generalizada asociado al proceso de deterioro habitual del hormigón.

Por lo tanto, es crucial que el ingeniero, al inspeccionar un puente de tipología "losa continua postesada" con presencia de numerosas fisuras de trayectoria longitudinal (tanto en la cara inferior como en las almas), sea capaz de considerar la posibilidad de que se trate de un problema relacionado con reacciones expansivas.

- Deformación de la losa en sentido longitudinal, por una reducción del módulo de elasticidad del hormigón. Normalmente este tipo de deformación, aun siendo notable en el centro de cada vano, se visualiza con mayor claridad en los elementos lineales secundarios como sistemas de contención, bordillos o impostas.



Figura 5. Deformación del tablero (ver la referencia de la barandilla azul)

- Otro signo son los 'pop-ups' o pequeños desconchones puntuales que aparecen como consecuencia de la reacción de áridos puntuales muy superficiales, junto con la formación de gel por AAR. En caso de que se observen, es conveniente registrar el número, tamaño y distribución de los desconchones y, si es posible, el tipo de árido. Es posible confundir este tipo de pequeños

defectos con otros similares provocados por la acción hielo-deshielo, e incluso por detalles constructivos (como, por ejemplo, los clavos empleados en el encofrado).

2.1.4. Daños secundarios (y no menos importantes)

Las reacciones árido-álcali producen productos expansivos, que se concentran en la interfase árido-pasta produciendo tensiones internas que fisuran el hormigón en los primeros estados de la reacción hasta formar grietas de gran tamaño, que llega a la superficie. Esto afecta de manera directa a la resistencia y al módulo de elasticidad del hormigón, además, abren caminos preferentes para otros agresivos como el CO_2 del ambiente, sales de deshielo o cloruros que generan corrosión y, por tanto, otro daño añadido. Esto provoca los daños derivados del agua (normalmente con sales fundentes) en las armaduras, que produce roturas puntuales en la armadura pasiva en la cara superior y rotura de cordones de pretensado en el interior de las vainas de la armadura activa.



Figura 6. Corte de armadura pasiva por corrosión por picaduras

2.2 Ensayos de confirmación

Una vez identificado un puente que cumpla los criterios descritos en los párrafos anteriores, se pueden plantear una batería de ensayos de confirmación que se pueden dividir en dos grupos:

2.2.1 Ensayos convencionales

En primer lugar, se realiza la inspección visual macroscópica de los testigos extraídos para analizar el estado del hormigón, detectar roturas, coqueras, fisuraciones, cambios de color, porosidad, tamaños de áridos, restos de gel alrededor de los áridos y estado de la pasta del hormigón. Posteriormente, se debe realizar la caracterización mecánica del hormigón mediante la resistencia a compresión simple (UNE EN

12390-3 [4]) y la determinación del módulo elástico (UNE EN 12390-13 [4]).

Como se mencionó previamente, la fisuración del hormigón provoca una disminución de ambos parámetros, aunque no con la misma velocidad. El módulo de elasticidad va disminuyendo de una manera uniforme en el tiempo y es el primer indicador de los efectos de este tipo de reacciones; la resistencia a compresión solo tiene un descenso claro cuando el proceso ya está en un estado muy avanzado.

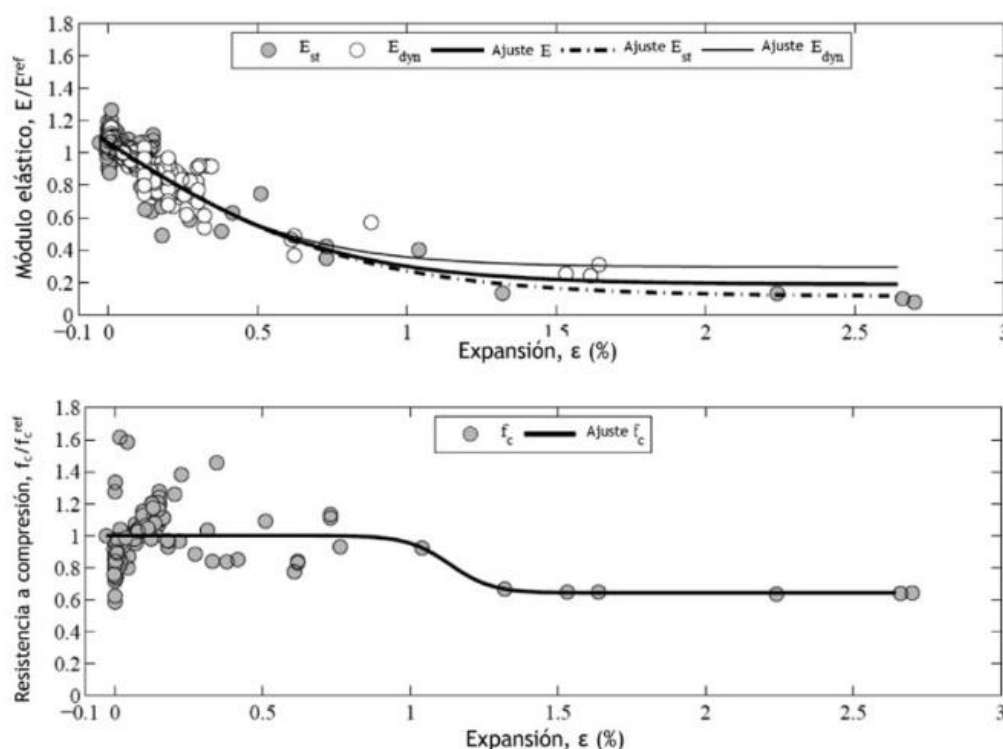


Figura 7. Disminución del valor del módulo de elasticidad en el hormigón fisurado por reacciones de tipo árido-álcali (arriba) y en la resistencia a compresión (abajo) [4]

2.2.2 Ensayos especializados.

- Estereomicroscopía. Se emplea para localizar productos de reacción y permite seleccionar las muestras para su estudio mediante microscopía electrónica.
- Microscopía electrónica para identificar alteraciones en la interfase árido-pasta. Se utiliza la microscopía electrónica de barrido con electrones retrodispersados (SEM-Back scattering). También se determina la composición química semicuantitativa de elementos en varios

puntos mediante Energía de Dispersión de Difracción de Rayos X o EDX.

- Determinación del comportamiento expansivo de áridos extraídos del hormigón. Con el fin de observar la expansión residual remanente en los áridos de la estructura se toma y evalúa, en su caso, la fracción de reacción consumida de ellos y para ello se amasan barras de mortero con los áridos extraídos y se ensayan según la Norma UNE 146508 [4][10].

3. Consecuencias

La principal consecuencia de no identificar a tiempo el problema puede derivar en dos posibles escenarios: por un lado, la resistencia a compresión puede agotarse hasta alcanzar niveles que pongan en entredicho la capacidad resistente del elemento estructural afectado; por otro lado, dicha capacidad puede verse comprometida por la rotura de armaduras activas. En este último caso, la situación más frecuente es que se detecten algunas roturas, pero no se pueda conocer con certeza el estado real de las armaduras a lo largo de toda su longitud, debido a las dificultades técnicas para caracterizar adecuadamente el estado de los cordones de pretensado.



Figura 8. Demolición de un puente en Madrid, afectado por reacciones árido-álcali

En cualquier caso, ninguna de las dos situaciones permite plantear una reparación o refuerzo tras pasados ciertos límites, ya sea la resistencia a compresión por debajo de unos valores mínimos o por la constatación de pérdidas del postesado y la incapacidad para establecer el nivel de seguridad remanente.

Debido a la gravedad de las consecuencias, es crucial identificar estos casos en etapas tempranas y aplicar medidas preventivas para mitigar sus efectos, siempre que sea técnicamente viable.

4. Actuaciones posibles

En el caso de que un puente haya sido correctamente diagnosticado con esta patología (reacciones árido-álcali o sus daños derivados) y no se encuentre en ninguna de las dos situaciones descritas —es decir, que todavía existan opciones para su rehabilitación—, las actuaciones deben centrarse en resolver dos aspectos principales:

- Eliminar la causa original del problema. De los tres ingredientes necesarios para que se desarrollen los mecanismos de las reacciones árido-álcali, no se puede sustituir ni el árido reactivo ni los álcalis del cemento empleado para ejecutar el hormigón original. Por lo tanto, la única alternativa viable es la eliminación del agua en contacto con el hormigón de la ecuación. Para ello, la estrategia consiste en ‘envolver’ el elemento estructural, que en el caso descrito en este artículo es fundamentalmente el tablero, en una película o sistema de impermeabilización que evite que el agua entre en el interior del elemento.

Esto no implica que todos los paramentos deban quedar recubiertos por dicho sistema; de hecho, es recomendable permitir que el agua tenga una salida por la cara inferior de la losa, para evitar la acumulación de agua dentro de los aligeramientos.



Figura 9. Puente en Valladolid tratado en 2015 con sistema de impermeabilización de tipo poliuretano-metacrilato en cara superior y almas, con tratamiento hidrofugante en tabla inferior (imagen tomada en 2024)

Los paramentos más expuestos a la entrada de agua (cara superior, ya sea bajo pavimento o bajo aceras y caras laterales -voladizos y almas-) sí deben quedar protegidos con el tratamiento más efectivo y de mayor capacidad en las condiciones de estanqueidad.

- Reparar los deterioros ya producidos como consecuencia de las reacciones árido-álcali. Normalmente estos deterioros son las numerosísimas fisuras y grietas en el elemento afectado, de abertura variable (aunque más grandes sobre tablero que bajo el mismo), así como desconchones en el hormigón.

La presencia de armaduras pasivas corroídas y rotas es frecuente sobre todo en la cara superior, debiendo verificar la necesidad de un refuerzo completo en toda la superficie si a lo largo de una grieta longitudinal el agua con sales fundentes ha cortado como si fuera un cuchillo una alineación completa de armaduras transversales.



Figura 10. Vista de las fisuras selladas e inyectadas en la tabla inferior de un puente en Valladolid afectado por reacciones árido-álcali

El cuidado en los detalles resulta fundamental para garantizar que el agua no penetre en el interior del elemento estructural. Esto implica el tratamiento de las aristas en bordes de tablero o contacto con aceras o sistemas de contención, para que el sistema de impermeabilización tenga una transición compatible con sus

características. Asimismo, la salida del agua por los sumideros, la mejora de la estanqueidad de las juntas de dilatación con ayuda de bandas estancas o la colocación de canalones y vierteaguas en bordes de la losa son puntos cuyo correcto diseño permite mejorar la vida útil de las actuaciones en su conjunto y del propio puente.

5. Conclusiones

Aunque los procesos de reacción árido-álcali en el hormigón estructural de los puentes no afectan a la mayoría de las infraestructuras, existen circunstancias geográficas y tipologías de puentes más propensas a presentar este tipo de patologías. Las consecuencias de no tratarlas a tiempo pueden llevar incluso a la demolición del puente antes de alcanzar el fin de su vida útil.

Ante tales posibles consecuencias, parece claro que mejorar la identificación de los potenciales pacientes resulta no ya conveniente, sino necesario, al menos en aquellas zonas que se han demostrado como áreas conflictivas. La mejora en el proceso de identificación es una tarea didáctica y formativa entre el personal que interviene en el mantenimiento de los puentes, fundamentalmente para que los inspectores tengan esa capacidad de identificación de los síntomas que ellos pueden ver, pero también los gestores del mantenimiento, para que pongan el foco en estos casos y lo que implica en términos de coste la resolución de cada uno de ellos.

No obstante, hay que tener en consideración que los puentes más recientes (últimos 15 años) cuentan ya con una Normativa más limitativa en cuanto a la reactividad de los áridos empleados en la fabricación del hormigón y también el uso de cementos con menor contenido de álcali, lo que reduce este tipo de procesos de deterioro. Si a ello añadimos que ya se empieza a normalizar la aplicación sistemática de los sistemas de impermeabilización en tableros de puente, puede que la patología

descrita quede circunscrita mayoritariamente a un periodo constructivo concreto (1980-2010).

Agradecimientos

Los autores de este artículo quieren expresar su agradecimiento a las Administraciones que han permitido y auspiciado las investigaciones necesarias para avanzar en la mejora del conocimiento de los efectos de las reacciones árido-álcali en el hormigón estructural, en particular al Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, al Ayuntamiento de Madrid y a la Comunidad de Madrid.

Referencias

- [1] Martín-Caro Álamo, J.A., Martínez, J.L., Arias Hofman, G. (2021). Los problemas árido álcali o la necesidad de anticiparse a un proceso irreversible en los puentes, *Hormigón y Acero*, 72(294-295), 219-232, <https://doi.org/10.33586/hya.20213069>
- [2] Esposito, R., Anac, C., Hendriks, M. A. N., & Copuroglu, O. (2016). Influence of the alkali-silica reaction on the mechanical degradation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016007-1-04016007-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001486](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001486)
- [3] Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete Structures. Part 1, Diagnosis (AAR 6.1). RILEM State-of-the-Art Reports. (2013). Bruno Godart, Mario ed Rooij, Jonathan G.M. Wood eds.
- [4] Structural effects of alkali-silica reaction. Technical guidance on the appraisal of existing structures. 1992 con addendum de 2010. The Institution of Structural Engineers.
- [5] Bruno Godart, Mario ed Rooij, Jonathan G.M. Wood eds. (2013) *Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete Structures*. Part 1, Diagnosis (AAR 6.1). RILEM State-of-the-Art Reports.
- [6] UNE-EN 12504-1:2020 *Ensayos de hormigón en estructuras*. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión).
- [7] UNE-EN 12390-3 2013: *Ensayos en hormigón endurecido*. Parte 3: determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [8] UNE-EN 12390-13 2013: *Ensayos en hormigón endurecido*. Parte 13: determinación del módulo secante de elasticidad en compresión.
- [9] UNE 146508 2023: *Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero*.
- [10] Mater. Construcc., Vol. 60, 299, 69-78, julio-septiembre 2010. ISSN: 0465-2746. doi: 10.3989/mc.2010.48708