

# Los problemas árido álcali o la necesidad de anticiparse a un proceso irreversible en los puentes

## *Alkali-Aggregate Problems or the Need to Anticipate an Irreversible Process in Bridges*

José Antonio Martín-Caro Álamo<sup>a</sup>, José Luis Martínez Martínez<sup>a</sup>, Gonzalo Arias Hofman<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero de Caminos. INES Ingenieros

<sup>b</sup> Ingeniero de Caminos. INES Ingenieros

Recibido el 1 de febrero de 2020; aceptado el 16 de abril de 2021

### RESUMEN

Las reacciones expansivas en el hormigón, y en particular las reacciones por reacción árido-álcali, no son un problema desconocido ni novedoso (como atestiguan las investigaciones de Thomas Stanton, [figura 1](#)), pero están empezando a adquirir una presencia cada vez más visible en los puentes de las carreteras españolas (siendo en cualquier caso un problema minoritario, las consecuencias son, en ocasiones, irreversibles). Así se ha constatado en el curso de numerosas y recientes campañas de inspección en las que han participado los autores de este artículo, en algunos casos con consecuencias traumáticas cuando la enfermedad se ha manifestado y ha alterado las características del hormigón hasta un extremo que ha obligado a demoler la estructura.

El presente artículo pretende proponer unas recomendaciones para el reconocimiento visual de la sintomatología que define estos procesos y una metodología que permita analizar la incidencia de este fenómeno en la disminución de las propiedades mecánicas del hormigón y en el comportamiento resistente del puente.

PALABRAS CLAVE: Mantenimiento estructuras, vida útil, AAR, modelos de evolución de daños.

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Todos los derechos reservados.

### ABSTRACT

Expansive reactions in concrete, and in particular alkali-aggregate reactions, are not an unknown or new problem (as evidenced by the investigations of Thomas Stanton, [figure 1](#)), but they are beginning to acquire an increasingly visible presence on Spanish road bridges (being in any case a minority problem, the consequences are sometimes irreversible). This has been verified in numerous and recent inspection campaigns in which the authors of this article have participated, sometimes with traumatic consequences when the disease has manifested itself and has altered the characteristics of the concrete in such way that the structure was demolished.

This article aims to propose some recommendations for the visual recognition of the symptoms that define these processes and a methodology that allows to analyze the incidence of this phenomenon in the reduction of the mechanical properties of the concrete and in the resistant behavior of the bridge.

KEYWORDS: Maintenance of structures, service-life, AAR, damage evolution models.

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. All rights reserved.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del conjunto de patologías inherentes al hormigón, una de las más agresivas es el desarrollo de procesos expansivos de distinto tipo (reacciones árido – álcali, formación de ettringita,

sal de Friedel, etc.). Estos procesos pueden llegar a ser identificados, al menos como una posibilidad plausible, mediante las inspecciones visuales que se realizan periódicamente para llevar un seguimiento de los puentes.

\* Persona de contacto / *Corresponding author*.  
Correo-e / email: [jmc@inesingenieros.com](mailto:jmc@inesingenieros.com) (José Antonio Martín-Caro Álamo)



Figura 1. Thomas Stanton, de la California State Division of Highways, en 1940, uno de los primeros investigadores de las reacciones árido-álcali (cortesía FHWA).

Numerosas administraciones públicas y concesionarios de autopistas en España han implementado Sistemas de Gestión de Puentes mediante los cuales planifican, organizan y supervisan el estado de conservación de los mismos, cada uno con una metodología particular, puesto que no hay una Normativa oficial que dicte cómo se deben realizar las inspecciones de puentes. En España, el documento que marca en cierta forma la pauta de las inspecciones principales de estas estructuras de carretera es el redactado por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA)<sup>1</sup> [1], en el que se citan este tipo de procesos degradativos como una patología que se manifiesta en forma de fisuras en el hormigón por ataque químico y disrupción mecánica, sin una mayor especificidad. En la literatura global, el estado del arte de RILEM [2] es quizás el documento más completo que contiene indicaciones específicas para el diagnóstico.

Resulta por lo tanto necesario mejorar la metodología de inspección y la formación de los propios inspectores para este tipo de patologías específicas, de forma que el diagnóstico que se emite tras una inspección principal pueda ser más preciso y certero a la hora de identificar posibles pacientes de AAR (reacción árido-álcali, en sus siglas en inglés). Este es uno de los objetivos que pretende este artículo. El otro es tratar de establecer, desde el punto de vista del comportamiento estructural, los umbrales que definen los límites entre los posibles tratamientos que tiene esta enfermedad: en primer lugar, la reparación y protección de la estructura, en segundo término, el refuerzo y protección de la misma y, finalmente, la demolición como solución última.

Todos los casos en que está basado este artículo se corresponden con numerosas campañas de inspecciones de puentes llevadas a cabo por equipos dirigidos por los autores de este artículo en los últimos 10 años en carreteras del centro, norte y noroeste de España. Entre todos los puentes inspeccionados (varios miles de casos), se han llegado a identificar patologías como las descritas en este artículo en 19 puentes. Aunque en términos estadísticos la incidencia es muy baja, son las consecuencias sobre los puentes las que obligan a tratar de una forma especial este problema. Por la casuística recogida en estos años, este tipo de anomalías afectan especialmente a los puentes de tipología losa continua de hormigón postesado, y a este grupo de puentes en particular va dirigido este artículo.

## 2. BREVE RESUMEN DE LA REACCIÓN ÁRIDO-ÁLCALI

La reacción árido – álcali genera un producto, gel de sílice, que se deposita en el interior y en el contorno de los áridos. Este material, en presencia de humedad, aumenta su volumen, lo cual produce dos efectos: expansión de la masa de hormigón y fisuración tanto de los áridos como de la matriz de cemento

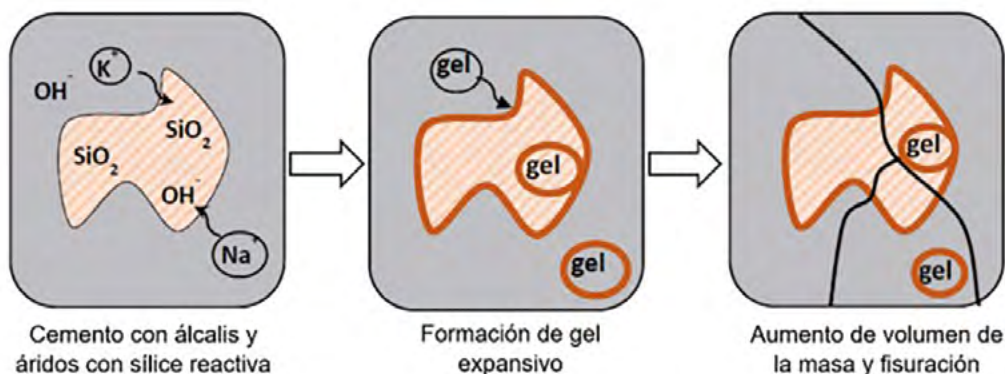


Figura 2. Proceso de formación de gel de sílice y fisuración del hormigón ([2]).

<sup>1</sup> En la fecha de publicación del documento se denominaba Ministerio de Fomento.

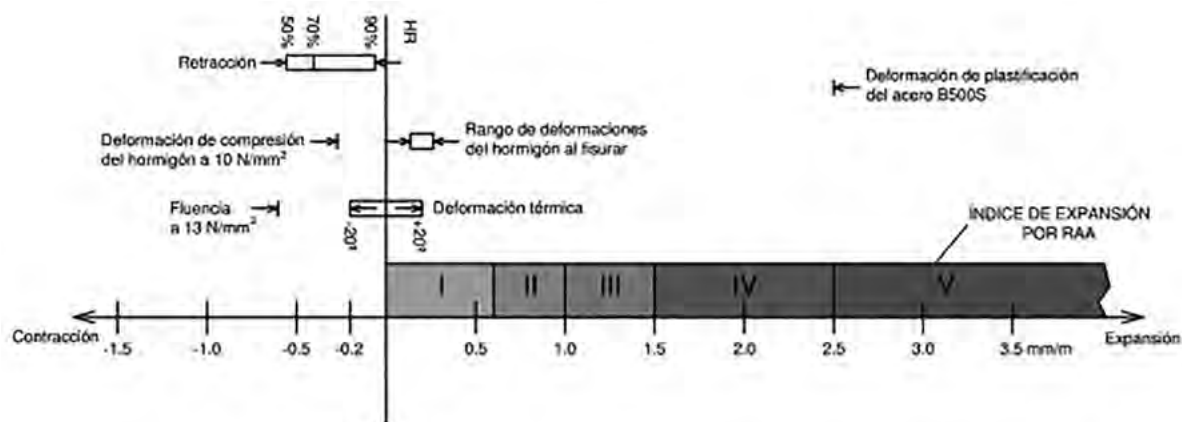


Figura 3. Deformaciones por AAR comparadas con deformaciones estructurales. Adaptado de [3].

(figura 2), apareciendo las fisuras por las diferencias de deformaciones unitarias entre los componentes del hormigón.

Es interesante resaltar el orden de magnitud de la expansión volumétrica que produce la AAR ya que esta puede alcanzar valores muy superiores a las deformaciones estructurales (figura 3). El índice de expansión por AAR es una clasificación de la intensidad del ataque creado por la Institution of Civil Engineers [3].

El desarrollo de la fisuración debida solo a AAR es uniforme y lineal con el tiempo, y el ataque por AAR puede empezar a mostrar síntomas visibles a partir de 1 a 5 años desde la construcción, pero se han encontrado ejemplos en que los síntomas se hacen patentes mucho tiempo después, por lo que la edad de los puentes no es una cuestión relevante, aunque sí condicionante.

El tipo de árido reactivo suele ser en la casi totalidad de los casos árido silíceo (por lo que también es conocido este fenómeno como reacción álcali-sílice, ASR, en sus siglas en inglés), mientras que la reacción álcali-carbonato (ACR) es extremadamente rara. Los áridos más reactivos son calcedonia, ópalo, pedernal poroso y areniscas impuras. Los álcalis son fundamentalmente óxido de sodio y potasio del cemento.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA SINTOMATOLOGÍA

La existencia de procesos expansivos en el hormigón se puede determinar con los correspondientes ensayos físico-químicos, pero, como es lógico, no se puede plantear la realización de este tipo de pruebas en todos los puentes de forma sistemática. Lo que se plantea en el marco de los Sistemas de Gestión de Puentes es un protocolo que permita cribar aquellos que pueden estar afectados por reacciones expansivas, siguiendo estas etapas:

- 1) Identificar los casos posibles mediante inspecciones visuales.
- 2) Realizar pruebas de caracterización del hormigón a un reducido número de puentes.
- 3) Estudiar en profundidad aquellos casos que han confirmado los síntomas en las etapas previas.



Figura 4. Detalle de fisuras longitudinales abiertas en la cara inferior de la losa de un tablero.

Para describir los síntomas de estos procesos, se debe atender en primer lugar a los aspectos físicos visibles, que pueden ser identificados en una inspección principal visual por un ojo debidamente entrenado para ello, como indicadores de posibles procesos expansivos (ver detalle de la fisuración longitudinal en la cara inferior de una losa de hormigón postesado, figura 4). En segundo lugar, se deben definir los parámetros de caracterización del hormigón que indican la posible existencia de estos procesos. A continuación, se describen los ensayos físico-químicos que pueden caracterizar de forma inequívoca la existencia de estos procesos expansivos y, por último, se deben realizar las comprobaciones estructurales que permiten definir el nivel de seguridad de cada puente.

En cuanto a los aspectos físicos visibles, que puede identificar un inspector (con la debida formación y conocimiento) hay que tener en cuenta que los procesos expansivos en el hormigón, como son las reacciones árido-álcali, pueden estar produciéndose sin que ello implique una visibilidad externa, pero cuando el proceso se encuentra en un estado avanzado se manifiestan síntomas, principalmente en forma de fisuras e incluso en algunos casos como una deformación de la propia losa del tablero (algo que no sucede cuando el problema afecta

a los estribos o a las pilas). Si el problema se encuentra muy avanzado, las fisuras dan paso a lajación y pérdidas del hormigón de recubrimiento, pero se trata de un efecto inducido fundamentalmente por la corrosión de las armaduras, como consecuencia de su exposición a los agentes agresivos por la presencia previa de numerosas fisuras. La fisuración provocada por AAR se orienta en gran medida en la dirección de las tensiones de compresión y no se debe únicamente a la corrosión de la armadura (aunque con el tiempo se suma también ese efecto). En [figura 5](#), [figura 6](#) y [figura 7](#), se muestran fisuras en puentes afectados por AAR sobre distintos elementos estructurales.

Este tipo de fisuras, que en un elemento de hormigón en masa tendrían una trayectoria irregular (errática), se orientan, especialmente en el caso de las losas, en una dirección predominantemente longitudinal. Se aprecian sobre todo en la cara inferior y almas de la losa, y también en su cara superior, pero al estar oculta normalmente bajo el pavimento estas no suelen ser visibles salvo que se observen en una operación de repavimentación del tablero.

Esta orientación de las fisuras, que se puede explicar por la compresión a la que está sometida la losa por el sistema de postesado, confunde muchas veces al inspector de puentes, que atribuye su causa a la falta de recubrimiento o corrosión de las armaduras, es decir, a un problema de corrosión generalizada dentro del habitual proceso durable del hormigón.

Por ello, es importante que si el ingeniero está inspeccionando un puente de tipología 'losa continua postesada' con presencia de numerosas fisuras de trayectoria longitudinal (en su cara inferior y almas) sea capaz de plantearse la posibilidad de que se trate de un problema de reacciones expansivas. Puede apreciarse incluso en la [figura 6](#) que, en los estribos, las fisuras se alinean de forma horizontal. En estos elementos también aparecen fisuras en direcciones ortogonales y la mayor abertura de las fisuras horizontales o verticales responde más a la mayor exposición de unas armaduras u otras (en función del recubrimiento).

En la [figura 8](#) se puede observar la deformación de una losa como consecuencia de la disminución de las características resistentes en el hormigón. Los puntos bajos se corresponden con el centro de luz de cada vano.

En la literatura especializada se menciona también otro síntoma, que son los 'pop-ups' o pequeños desconchones puntuales ([figura 9](#)). Estos desprendimientos son 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 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).

Se resumen, a continuación, estos síntomas y su evolución, por la importancia que tiene el reconocimiento de los mismos.

### **Defectos superficiales**

En estadios iniciales del ataque (expansiones de entre 0.4 y 0.6 mm/m) la AAR tiende a incrementar las fisuras ya iniciadas por otras causas por lo que el patrón de fisuras no tendrá una impronta claramente reconocible.

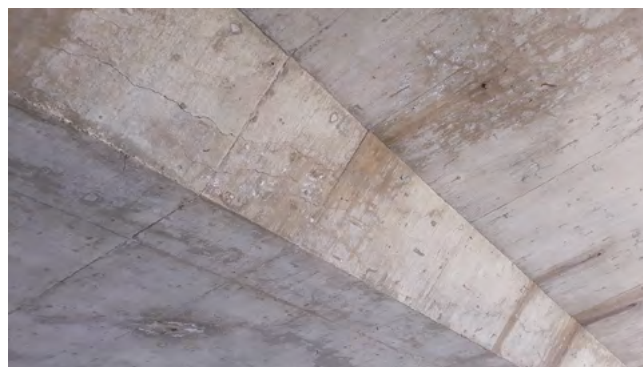


Figura 5. Fisuración longitudinal en el alma de una losa postesada.



Figura 6. Fisuración horizontal en estribo.



Figura 7. Fisuración vertical en una pila.

Cuando el daño ha progresado más, suelen presentarse las siguientes características [2]:

- En elementos sin deformación impedida y sin una dirección predominante de las tensiones de compresión, se observa fisuración extensa en forma de mapa.
- En elementos comprimidos por el pretensado, por los es-



Figura 8. Detalle de la deformación longitudinal de la losa de un tablero.

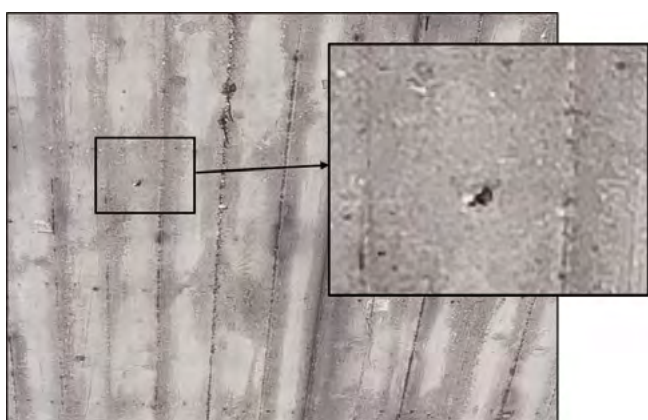


Figura 9. Pequeños desprendimientos en cara inferior de losa.



Figura 10. Fisuras con rotura de áridos, a veces rellenas de material de la reacción, observadas en un corte transversal de una estructura afectada por AAR.

fuerzos de las cargas exteriores o por tener impedida la deformación por efecto de la armadura o de otros elementos con los que topa, se observa fisuración orientada en paralelo a las compresiones o a la dirección de la restricción del movimiento expansivo.

- Signos de expansión de la masa de hormigón visibles como movimientos relativos entre distintas partes de la estructura y movimientos fuera del plano entre los labios de fisuras.
- Áridos partidos (en caso de que puedan observarse estos).

Dependiendo del tipo de áridos, se presentan los siguientes síntomas:

- Las fisuras pueden rellenarse con los productos de la reacción (gel de sílice).
- Decoloración de la superficie, especialmente coincidiendo con las fisuras.
- Saltado del recubrimiento en ciertas zonas.
- En ocasiones, saltados puntuales de los áridos en superficie (lo que también puede deberse a la helada) o 'pop-ups'.

### Fisuras

Como se ha dicho, es típica de la AAR la presencia de fisuras que parten áridos gruesos y progresan a través de la pasta de cemento conectando distintas roturas de áridos. Es frecuente que estas fisuras (en la pasta o en los áridos) se rellenen con gel de sílice (figura 10).

En elementos sin restricción de movimientos ni dirección predominante de las tensiones de compresión, ya se ha mencionado que la fisuración es en mapa. Para distinguir si la fisuración es causada por AAR o por secado o retracción plástica no se debe prestar atención a la morfología sino al momento de aparición. La fisuración por retracción aparece días o semanas después de la construcción, mientras que la vinculada a AAR suele aparecer tiempo después (incluso años después). Es necesario por tanto revisar inspecciones anteriores y comparar fotografías si están disponibles. Para observar las fisuras es con-

veniente limpiar la superficie con un cepillo rígido y proyectar agua con un espray dejando que seque la superficie.

En otros elementos o partes de la estructura pretensados, comprimidos o dotados de una fuerte cuantía de armadura pasiva la fisuración por AAR se orienta en el sentido de la compresión o de la armadura.

### Movimientos y deformaciones

La expansión propia de la AAR es similar a la de una dilatación térmica (aunque en el caso de AAR solo está afectado el hormigón, no la armadura) y puede manifestarse en los siguientes síntomas:

- Cierre de las juntas de dilatación.
- Torsión o abombamiento de superficies inicialmente planas.

La AAR conlleva una disminución del módulo de deformación incluso en estadios tempranos del proceso por lo que, en puentes de hormigón armado, puede observarse un aumento de las flechas. En puentes pretensados, en función de su cuantía, este efecto puede atenuarse o no aparecer ya que al bajar el módulo también aumentan las flechas debidas al pretensado, que tienen signo contrario a las de las cargas gravitatorias.

La tabla 1 da indicaciones para la interpretación de los síntomas detectables visualmente.

## 4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

### 4.1. Ensayos de caracterización del hormigón

La bibliografía existente describe los principales parámetros que permiten caracterizar el hormigón afectado por este tipo de procesos (sin recurrir aún a ensayos de tipo físico químico que se describirán posteriormente):

- El parámetro que mejor se correlaciona con daños causados por reacción álcali-árido es el módulo de elasticidad,

que muestra reducciones claras y monótonas para cualquier expansividad, al contrario de la resistencia a compresión, que muestra valores muy variables (figura 11).

- Todos los estudios utilizan como parámetro cuantificador de la reacción la expansividad medida en probetas (moldeadas para estructuras nuevas o extraídas en estructuras existentes).

A partir de ahí, parece que se debe prestar atención al módulo y tratar de ensayar la expansividad, que da información sobre la reactividad remanente.

Se extraen en la figura 11 dos imágenes de [2], que muestran las variaciones en módulo y en resistencia de un gran número de casos extraídos de la bibliografía. Lo primero que se observa es que se relacionan las propiedades mecánicas con la deformación de expansión obtenida de probetas. Esto es una constante en muchos artículos sobre el tema. La segunda observación, también confirmada en otros muchos estudios, es que el módulo es un buen indicador de AAR incluso para deformaciones de expansión bajas, mientras que la resistencia no es un indicador claro, excepto para expansividades muy grandes, en cuyo caso las pérdidas típicas son del 40%.

Con la resistencia característica del hormigón se pueden producir descensos sobre los valores teóricamente esperables, pero la correlación no es tan clara y con valores bajos de expansividad hay una dispersión mucho menos clara que con los valores del módulo de elasticidad.

Para disponer de la información anterior es necesario extraer testigos en el hormigón endurecido, en las ubicaciones indicadas para cada puente. Los testigos se extraerán después de haber posicionado las armaduras previamente, con ayuda de un pachómetro o georradar, evitando el corte de aquellas. La posición de los testigos será tal que evite afectar a las armaduras activas. A falta de planos de proyecto del tablero del puente, se escogerán posiciones lógicas:

- Zona de momentos negativos: cara inferior o baja de las almas en áreas de apoyo, como pilas o estribos.
- Zona de momentos positivos: cara superior del tablero en centro de vano.

TABLA 1.  
Síntomas que indican probabilidad de ataque por AAR

Fenómeno	Tabla 1. Probabilidad de AAR		
	Baja	Media	Alta
Fisuración	No hay	Algunas zonas con fisuras típicas de AAR, como fisuras en mapa o fisuras alineadas con el armado o las tensiones	Fisuras en mapas o alineadas con las tensiones o la armadura en zonas extensas. Desalineación entre ambos lados de la fisura por hinchamiento diferencial del hormigón
Deformaciones o desplazamientos	No hay	Algunos	La estructura muestra síntomas de incremento de volumen que produce desplazamientos y desalineaciones de elementos
Decoloración superficial*	No hay	Ligera decoloración asociada a las fisuras	Línea de fisura con decoloración oscura mientras la zona adyacente muestra un hormigón más claro
Saltado superficial de áridos*	No hay	Algunos	Muchos
Exudaciones*	No hay	Exudaciones blanquecinas alrededor de algunas fisuras	Exudaciones gelatinosas sin color definido, compatibles con gel de sílice y asociadas con algunas fisuras
Clase de ambiente*	Seco y abrigado	Exterior pero protegido de la humedad	Elementos expuestos a la humedad de la lluvia, del terreno o por otra causa

(\*) Los fenómenos marcados con un asterisco se asocian a veces con AAR, pero su ausencia no permite descartar el ataque.

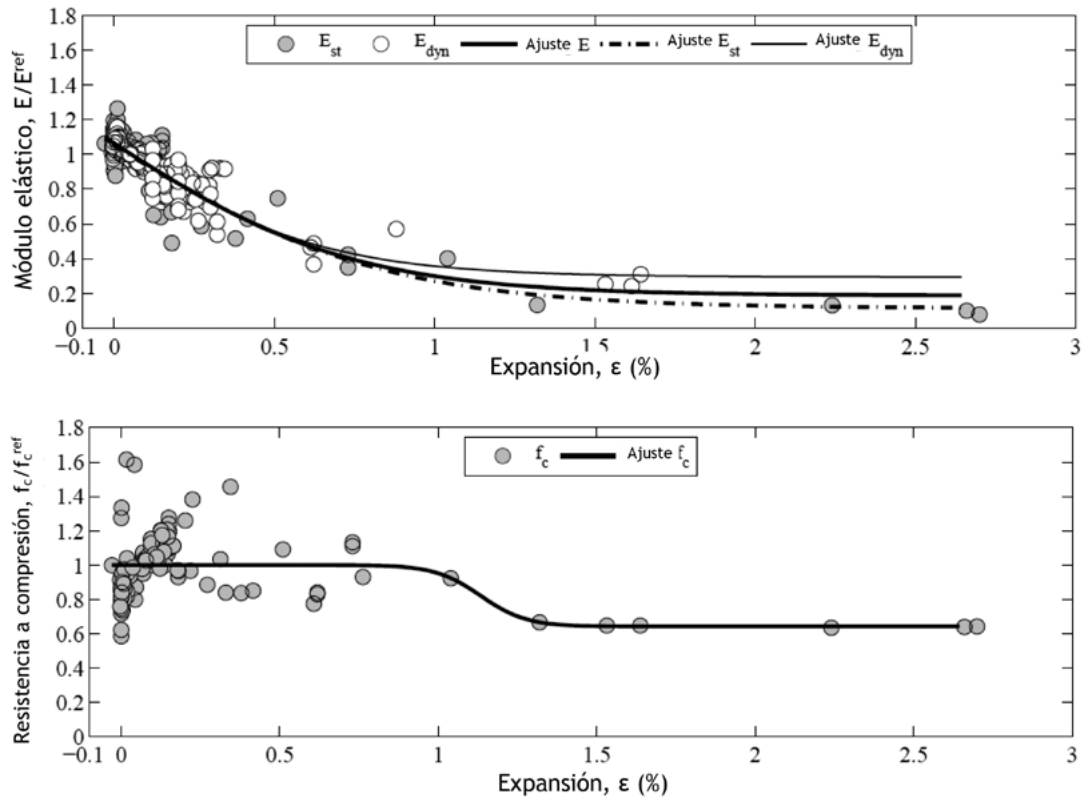


Figura 11. Variaciones en módulo (arriba) y en resistencia (abajo) [2].

La corona de extracción de los testigos será de diámetro 100 mm, para asegurar que el tamaño de árido (variable según cada caso) no afecte a los resultados de los ensayos. Su longitud será de 200 mm como mínimo de hormigón sano (es decir, si se cortan armaduras pasivas, esta distancia empieza a contar desde las armaduras, para asegurar 200 mm de hormigón sano). La razón de esta longitud es que los ensayos de rotura a compresión exigen una esbeltez (relación entre el diámetro y la longitud del testigo) de entre 1 y 2, mientras que para los ensayos de obtención del módulo de elasticidad es necesario un rango de esbelteces entre 2 y 4. Esto obliga a disponer de testigos de longitud  $L = 2D$ . Todos ellos deben ir perfectamente identificados, con una rotulación en su cara lateral, para garantizar su trazabilidad.

Todos ellos deben someterse a un análisis visual de daños aparentes, identificando su aspecto, presencia y localización de fisuras, restos de armadura y restos de óxido asociado a corrosión. Se seguirá UNE EN 12504-1 [9], en las que las probetas de ensayo, cilíndricas, se obtendrán cortándolas para conseguir superficies planas que se deben alinear mediante pulido y refrentado para garantizar su planeidad y paralelismo en la aplicación de la carga. En la caracterización de las propiedades mecánicas se usarán las siguientes normas:

- Resistencia a compresión simple (UNE 12390-3 [10])  
Este ensayo se debe hacer en primer lugar a 2 testigos del total de todos los extraídos en un puente, para tener una referencia de la resistencia característica, de forma que se puede realizar el ensayo de 'Determinación del módulo elástico' sobre un 30% del valor de resistencia caracte-

rística como valor de referencia. Posteriormente, después del ensayo de 'Determinación del módulo elástico' en el resto de los testigos, se hará el ensayo de 'Resistencia a compresión simple' en todos ellos.

- Determinación del módulo elástico (UNE EN 12390-13 [11]). La relación entre longitud de la probeta,  $L$  y el diámetro debe estar en el rango  $2 \leq L/d \leq 4$ . En caso de no cumplirse las tolerancias de las dimensiones normalizadas en UNE EN 12390-1 [12], para la determinación de la resistencia a compresión simple se aplicará el procedimiento del anexo B descrito en [10]. Para los ensayos de determinación de módulo elástico previamente deben conocerse las resistencias a compresión del hormigón de probetas extraídas en la misma zona. Las probetas de medida del módulo elástico se instrumentarán con tres galgas extensométricas adheridas equidistantemente a la superficie longitudinal de aplicación de la carga, para medir deformación y obtener tres valores por muestra, que permitirá dar valores promedio del módulo.
- Determinación de la velocidad de ultrasonidos en cada testigo extraído (UNE EN 12504-4 [13]). Esta técnica permite caracterizar de forma no destructiva un mayor conjunto de puntos de una estructura y ampliar, de forma indirecta, el conocimiento de la resistencia del hormigón (a partir de la correlación entre velocidades y resistencia a compresión de los testigos extraídos).

Adicionalmente, se aconseja realizar el estudio de la profundidad de penetración de la carbonatación en el hormigón de

los distintos puentes y elementos, que se hará siguiendo dos procedimientos:

- A la llegada de los testigos, se hará la determinación del frente de carbonatación sobre la superficie del testigo, usando timolftaleína (azul intenso en zona no carbonatada e incolora zona carbonatada).
- Se confirmará la profundidad de carbonatación según UNE 112011 [14].

#### 4.2. Ensayos de caracterización de los procesos expansivos

Hay ensayos específicos que caracterizan los procesos expansivos, pero al ser ensayos más lentos y complejos, se suelen aplicar al subconjunto de los puentes que en los dos pasos previos (identificación visual de los síntomas externos y descensos en los valores de módulo de elasticidad y resistencia a compresión) queden adscritos al grupo de posibles pacientes.

Hay dos ensayos muy utilizados para medir la expansión volumétrica como índice del potencial de desarrollo de la ASR:

- Ensayo en aire al 95% de HR y 38°C.
- Ensayo en solución 1 N NaOH a 38 °C.

El primero de ellos es más realista respecto a las condiciones del hormigón en la estructura mientras que el segundo está indicado para determinar la “reactividad residual” de los áridos. Ambos se describen en el punto 5.3.4 y apéndice F de [2]. La expansividad se determina en un periodo largo, de 6 meses a un año. Para ello se ideó el ensayo AAR-4.1 sobre prismas a 60°C en lugar de 38°C, que da resultados a 12 semanas. Este ensayo se describe en el documento del RILEM de 2016 [4]. El documento está pensado para hormigones nuevos por lo que su aplicación a una estructura existente hay que hacerla con cuidado, sobre todo en lo que respecta a la extracción de los áridos. También merece la pena considerar el “Modified Stiffness Damage Test (SDT)” (apéndice E de [2]). Este método permite obtener módulo, comportamiento en histéresis (energía disipada) y después resistencia a compresión utilizando los mismos testigos.

En resumen, los ensayos ‘avanzados’ que permiten disponer de una información completa para caracterizar los fenómenos físico químicos derivados de los procesos expansivos son los siguientes:

- Estereomicroscopía. Se observa la superficie en fractura fresca de los testigos mediante estereomicroscopía con el fin de localizar productos de reacción para su mejor análisis, el cual permite seleccionar las muestras para su estudio mediante microscopía electrónica en una segunda fase, pero solo en aquellos casos en que se sospeche de manera justificada que puede haber procesos AAR.
- Propiedades microestructurales mediante microscopía electrónica. Se toman muestras concretas de testigos para identificar alteraciones en la interfase árido-pasta. Los fragmentos se embuten en resina y se procede a su pulido para posterior observación mediante microscopía electrónica de barrido de 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. Las muestras para el MEB se metalizan y permiten visualizar los compuestos originados en las reacciones expansivas.

- Determinación del comportamiento expansivo de áridos extraídos del hormigón. Se realiza un análisis de su comportamiento expansivo en los testigos. Con el fin de obtener suficiente cantidad de áridos para fabricar probetas de mortero es necesario utilizar 2 000 g de hormigón. La extracción de los áridos de los testigos de hormigón se realiza, en primer lugar, con un tratamiento físico, con la finalidad de separar la pasta del árido y, posteriormente, un tratamiento químico que elimina los restos de pasta en ellos. 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. Se fabrican barras de mortero de acuerdo y se ensayan de acuerdo con UNE 146508 [15].
- Penetración de cloruros. Para su determinación (en el hormigón de los puentes) se extraen muestras en seco de hormigón a distinta profundidad. En los casos que sea posible se sacan muestras cada 5 mm en los primeros 2 cm y luego cada 1 cm hasta los 5 cm (7 ensayos por testigo). Para la determinación del contenido en cloruros totales, mediante ataque ácido, se sigue el procedimiento de UNE 14629 [16], los datos se expresan en % en peso de hormigón. Este ensayo se relaciona con el uso de sales fundentes en los tableros de puentes y el consiguiente riesgo adicional de corrosión de las armaduras, no específicamente con el problema de AAR.
- Contenido en sulfatos. Se estudia su contenido en los distintos hormigones. Para ello se tomaría una muestra de hormigón de los distintos testigos de los puentes, eliminando los áridos más gruesos, procediendo a su molienda. Esta muestra molida se disuelve en agua desionizada en una proporción solido/liquido 1/10. Se agita la suspensión mediante agitador magnético durante 5 min y se filtra la muestra. Los sulfatos solubles se detectan mediante cromatografía iónica. Los resultados se expresan en ppm. Este análisis del contenido de sulfatos en el hormigón permite considerar o descartar la existencia de un posible ataque simultáneo al AAR (por ejemplo, por formación de ettringita).
- Porosidad accesible al agua. Se determina de acuerdo con el método descrito en UNE 83980 [17]. Para ello las muestras seleccionadas se desecan hasta peso constante, posteriormente se sumergen en agua en ciclos de 24 horas hasta peso constante. A continuación, se hace el vacío introduciendo agua a 20°C durante 2 horas. Se restablece la presión atmosférica durante 24 horas y se pesa. Para determinar el peso aparente la muestra se pesa en un cesto perforado sumergido en agua.

Estrictamente, los tres últimos ensayos descritos no son necesarios en la caracterización de un proceso de tipo expansivo en el hormigón, pero no incrementan significativamente el alcance del estudio y, sin embargo, permiten descartar otro tipo de procesos degradativos y por ello se plantean como parte de un estudio completo.



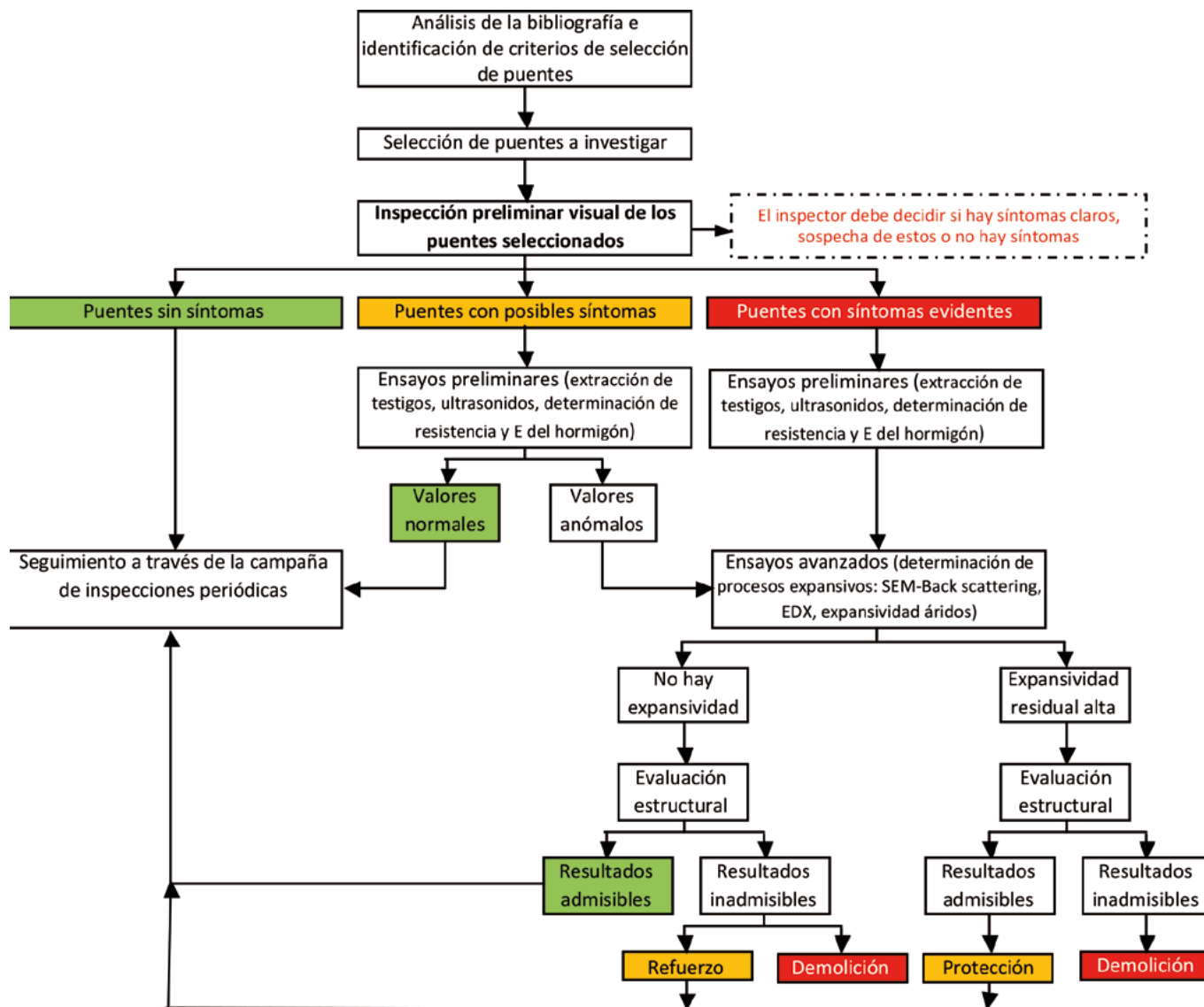


Figura 12. Metodología de estudio e identificación de casos graves.

## 5. METODOLOGÍA PROPUESTA

El diagrama de flujo expuesto en la [figura 12](#) resume el planteamiento de la metodología propuesta para identificar los casos en los que el desarrollo de procesos degradativos del hormigón de tipo expansivo (reacciones AAR, por ejemplo) exigen una actuación que resuelva o contenga la evolución de los mismos. Esta metodología está planteada para el estudio de un conjunto amplio de puentes, que obliga a realizar un cribado del conjunto, para concentrar los recursos en aquellos casos probables, descartando el resto en las etapas más avanzadas.

De la selección inicial se aplican criterios sencillos como la tipología estructural (se ha constatado que las losas continuas postesadas in situ suelen ser más propensas a este tipo de fenómenos) o los materiales (puentes de hormigón armado o pretensado/postesado). La edad puede ser otro criterio, ya que como se muestra en la [figura 13](#) hay muchos casos concentrados en torno

a 1990, aunque no deben descartarse otras épocas constructivas.

Uno de los pasos clave de esta metodología es el momento de la identificación de síntomas (sean estos claros o solo una posibilidad), denominado en la [figura 12](#) como 'Inspección preliminar visual de los puentes seleccionados'. La correcta interpretación de los defectos observados como síntomas de AAR, según lo descrito en el punto 3, permitiría obtener una selección acertada de casos y por ello se insiste en la necesidad de que los inspectores tengan una formación apropiada.

Hay una frontera en la toma de decisiones, que puede establecerse cuando se confirma la disminución de las propiedades resistentes del hormigón y la previsible evolución de los procesos expansivos. Esa frontera es la que determinará si la intervención va a ser traumática (demolición) o no (protección, refuerzo o seguimiento de la estructura) y la aplicación de un procedimiento como el resumido en la [figura 12](#) puede ayudar a detectar a tiempo los puentes afectados.

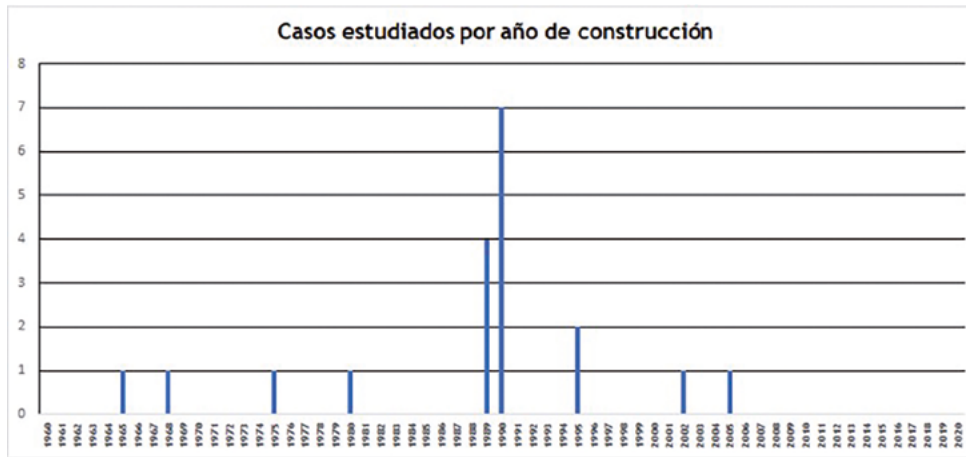


Figura 13. Casos estudiados con AAR, según el año de construcción del puente.

## 6. CONSECUENCIAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DE LOS PUENTES

El fenómeno de la AAR está ligado al comportamiento estructural en tres aspectos (figura 14):

1. Influye el estado tensional previo de la estructura en el desarrollo de la expansión volumétrica y fisuración propias de la AAR.
2. Repercute la expansión en el estado tensional en la estructura.
3. Consecuencias de la fisuración por AAR en las propiedades mecánicas del hormigón.

En este apartado se tratan brevemente los tres aspectos anteriores y se hacen algunas recomendaciones para el análisis de la seguridad de las estructuras afectadas por AAR.

### Estado tensional previo y restricciones a la expansión

Sin restricciones a la dilatación se desarrolla una fisuración isotrópica que se manifiesta en las superficies con un patrón “en mapa”. Cuando el fenómeno tiene lugar bajo una restricción unidireccional, las fisuras se orientan según esa dirección en los planos paralelos a la tensión y de nuevo “en mapa” en el plano perpendicular (Figura 15).

La tensión que se opone a la dilatación en una dirección puede deberse a los esfuerzos (incluido el del pretensado) o ser una reacción a la propia deformación impuesta de la AAR, bien porque el elemento afectado entra en contacto con otro que le impide moverse o con una masa de hormigón no reactivo, bien por la restricción que impone la armadura si esta tiene una cuantía suficiente.

Esta es la razón de que la fisuración se oriente en direcciones verticales en las pilas, en dirección longitudinal en las losas de los tableros de puente y en mapa en elementos sin restricciones ni direcciones predominantes de las tensiones. También explica los daños por saltado del recubrimiento al concentrarse la fisuración cerca de la superficie, quedando impedida cerca de la primera capa de armadura.

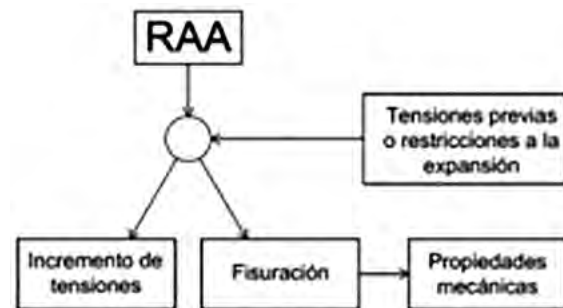


Figura 14. Esquema simplificado de las consecuencias sobre el comportamiento resistente de la AAR.

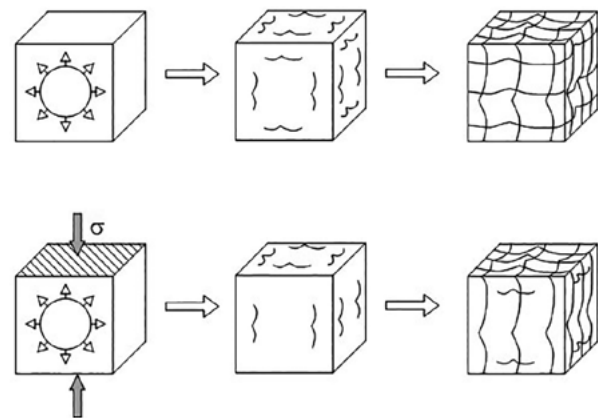


Figura 15. Desarrollo de la fisuración sin restricciones al movimiento (arriba) y con tensiones en una dirección [7].

Por supuesto, la fisuración observada no tiene por qué ser uniforme e igual entre distintas áreas, ya que distintos factores, como la presencia de humedad, pueden ser variables. De igual modo, si existían fisuras previas, la AAR puede ensanchar tales fisuras encubriendo el patrón característico de la reacción.

La tensión no solo afecta a la cinemática de la fisuración sino también al valor de la expansión. Numerosos ensayos han

puesto de manifiesto la influencia de la tensión de compresión en la reducción de la deformación de expansión. Según [3], se puede considerar que una tensión media de unos 4 N/mm<sup>2</sup> anula completamente la expansión (figura 16). De acuerdo con [8], estos efectos se anulan para tensiones entre 5 y 10 N/mm<sup>2</sup>. Este mismo aspecto, interpretado desde un punto de vista activo, conduce al concepto de reparación o contención de daños mediante confinamiento de elementos (encamisado). Por otro lado, la presencia de tensiones de tracción incrementa la expansión.

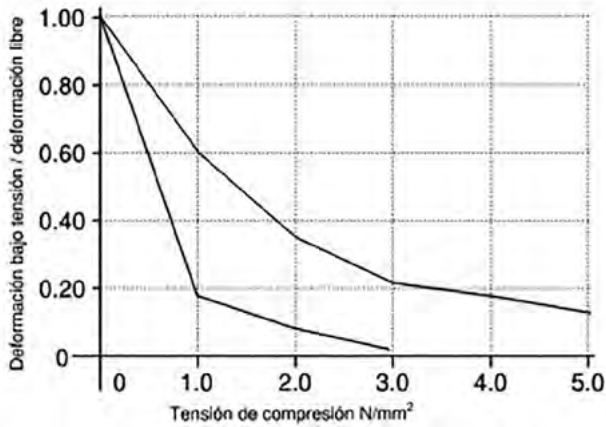


Figura 16. Variación de la deformación de expansión con la tensión de compresión según dos ensayos [3].

### Tensiones inducidas por la expansión por AAR

La expansión volumétrica por AAR es análoga a la deformación impuesta por retracción, pero con signo contrario y con una magnitud mucho mayor (figura 3). Como en la retracción, esta deformación impuesta afecta solo a la masa de hormigón y no a la armadura pasiva o activa. La compatibilidad de deformaciones entre hormigón y acero induce compresiones en el hormigón (que no puede dilatarse libremente por efecto de la restricción de la armadura) y tracciones en la armadura. Estos dos efectos combinados son enteramente análogos a un pretensado, razón por la que este efecto se describe a veces como pretensado químico.

Resolviendo la hiperestaticidad interna de una sección con armadura simétrica sometida a la deformación impuesta, se obtienen las deformaciones y tensiones en el hormigón y en el acero inducidas por la deformación de expansión por AAR.

$$\text{Deformación en el hormigón } \varepsilon_c = \varepsilon_{RAA} \left(1 - \frac{\rho n_{ef}}{1 + \rho n_{ef}}\right) \quad (1)$$

$$\text{Tensión en el hormigón } \sigma_c = \varepsilon_{RAA} E_s \left(1 - \frac{\rho n_{ef}}{1 + \rho n_{ef}}\right) \quad (2)$$

$$\text{Deformación en el acero } \varepsilon_s = \varepsilon_{RAA} \left(1 + \frac{1}{\rho n_{ef}}\right) \quad (3)$$

$$\text{Tensión en el acero } \sigma_s = \varepsilon_{RAA} E_s \left(1 + \frac{1}{\rho n_{ef}}\right) \quad (4)$$

Donde:

$\varepsilon_{RAA}$  es la deformación de expansión por AAR que se ten-

$\varepsilon_c$  y  $\varepsilon_s$  son las deformaciones en el hormigón y en el acero.  
 $\sigma_c$  y  $\sigma_s$  son las tensiones en el hormigón y en el acero.  
 $\rho$  es la cuantía de armadura ( $A_s/A_c$ ) dispuesta simétricamente.  
 $n_{ef}$  es la relación de módulos del acero y del hormigón, teniendo en cuenta la fluencia ( $E_s/E_{c,ef}$ ), con  $E_{c,ef} = E_{c,28} / (1 + \chi \varphi)$  en caso de que la deformación impuesta evolucione lentamente en el tiempo.

Las expresiones anteriores ponen de manifiesto que, a igualdad de deformación de expansión, las deformaciones de hormigón y acero y la tensión en el acero son decrecientes con la cuantía de armadura, mientras que la tensión de compresión en el hormigón crece con la cuantía de armado. Estas características se corresponden cualitativamente con los resultados experimentales reflejados en la figura 17.

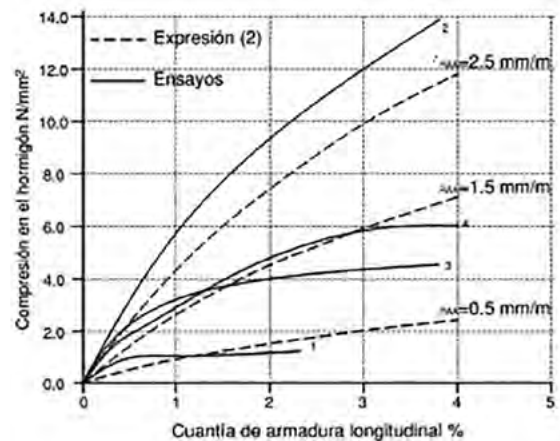
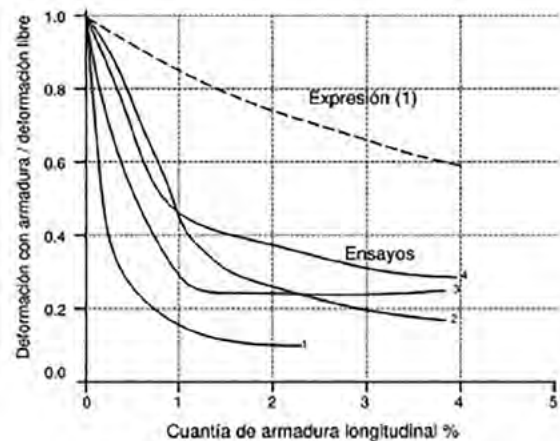


Figura 17. Variación de la deformación de expansión con la tensión de compresión según varios ensayos [7] y según las expresiones teóricas (1) y (2) con  $n_{ef}=17$ .

La figura 17 muestra la reducción de la deformación de hinchamiento por efecto de la armadura en función de la cuantía de esta observada en ensayos [7]. Los ensayos se hacen con cuantías máximas mucho mayores que las de tableros de puentes, pero incluso para el rango de cuantías usuales (en torno al 1%) se observan disminuciones significativas de la deformación medida. Esta reducción de la deformación global induce tensiones de compresión en el hormigón (figura 17, derecha) con

valores de varios N/mm<sup>2</sup>, comparables a los generados por el pretensado. Por supuesto, las correspondientes tracciones inducidas en la armadura pueden tener una magnitud también similar a las de un pretensado por lo que en la práctica es posible que el acero esté plastificado en servicio.

El hecho de que la deformación del acero sea mayor para cuantías bajas propicia que la deformación de los cercos sea en general mayor que la deformación de la armadura longitudinal. Con deformaciones libres  $\epsilon_{AAR}$  importantes, la armadura, en particular los cercos, pueden plastificar en servicio. Esta plastificación no supone una merma de la capacidad resistente a cortante (gracias a la compresión vertical que se induce paralelamente en el hormigón) siempre que los cercos estén correctamente anclados.

Consecuencias en las propiedades mecánicas del hormigón y en la respuesta resistente de los elementos estructurales

El ataque por AAR afecta a la resistencia a compresión, al módulo elástico y a la resistencia a tracción medida en ensayo brasileño sobre probetas o testigos. La [figura 11](#) muestra la reducción de resistencia a compresión y módulo en función de la expansión de la masa de hormigón. La resistencia a tracción tiene una dependencia de la expansión similar al módulo, más marcada que la de la resistencia a compresión. Es importante recordar que los valores de la disminución de las resistencias se refieren al valor a 28 días. En una estructura afectada por AAR normalmente se ha producido un incremento significativo de las resistencias por el paso del tiempo.

La referencia [3] contiene una descripción de los efectos de la AAR en la resistencia de distintos elementos estructurales bajo diferentes solicitaciones. A continuación, se citan brevemente los aspectos relacionados con los tableros de puentes. En vigas, la resistencia a flexión no se ve afectada gravemente por la AAR para valores de la expansión libre menores de 6 mm/m (0.6%). Para expansiones mayores, se han observado reducciones de resistencia de hasta el 25%. Para la evaluación se hacen los cálculos usuales teniendo en cuenta una resistencia a compresión reducida, según datos de ensayos en testigos o con estimaciones a partir de la tasa de expansión medida y correlaciones como la de la [figura 11](#). Es necesario, eso sí, observar si se han producido daños de lajación bajo la armadura principal.

En cortante, no se observan reducciones de la capacidad resistente si las vigas cuentan con cercos bien anclados en una cuantía de al menos el 0.2%. Al contrario, en numerosos ensayos se observan incrementos en la resistencia a cortante que pueden atribuirse al pretensado debido a la AAR. Según la bibliografía, el comportamiento de vigas pretensadas es similar al de las vigas armadas. Sin embargo, en nuestra limitada experiencia, hemos encontrado casos de viaductos de los años 70 en los que la merma de resistencia a compresión es un problema para la seguridad a cortante de las bielas comprimidas del alma. En esa época el nivel de pretensado era muy alto comparado con la práctica posterior y se dan casos en los que además se disponía una baja cuantía de armadura transversal.

Aparte de las comprobaciones globales de resistencia ante esfuerzos, debe tenerse presente que el ataque por AAR reduce la resistencia a tracción del hormigón y con ella todos los fenómenos relacionados. En particular el anclaje y solape de las armaduras se ve afectado sobre todo si la zona de anclaje o solape no cuenta con un recubrimiento generoso y las barras no están atadas por cercos. Para deformaciones libres de más

de 4 mm/m (0.4%), recubrimientos del orden de 1.5 veces el diámetro de las barras y ausencia de cercos, la reducción de la tensión de adherencia es del orden del 50%. Esta reducción es lineal con la reducción de la resistencia a tracción obtenida en ensayo brasileño. Clark y Chana, citados en [7] proponen la siguiente relación entre la tensión de adherencia y la resistencia a tracción indirecta afectada por AAR:

$$f_{bs} = \alpha \left( 0.5 + \frac{c}{\phi} \right) f_{ct} \quad (5)$$

Donde:

- $f_{bs}$  es el valor característico de la tensión límite de adherencia para barras corrugadas.
- $\alpha$  es un coeficiente que depende de la posición de la barra en la sección y que toma valores de 0.60 en general, 0.43 para barras situadas en la cara superior de la sección o en una esquina en la cara inferior y 0.30 para barras de esquina en la parte superior de la sección.
- $c$  es el recubrimiento geométrico.
- $\phi$  es el diámetro de la barra.
- $f_{ct}$  es el valor característico de la resistencia a tracción indirecta del hormigón afectado por AAR.

La expresión anterior, más allá de su uso directo, sirve para poner de manifiesto que la reducción de la tensión de adherencia es proporcional a la reducción de la resistencia a tracción indirecta del hormigón. Si la estructura presenta síntomas de fallos de anclaje, tiene recubrimientos bajos y detalles con falta de armadura transversal puede ser conveniente hacer ensayos brasileños sobre testigos representativos del hormigón de las zonas críticas.

### **Análisis de la seguridad de los puentes afectados por AAR**

La práctica habitual y recomendada en la bibliografía consiste en hacer las comprobaciones habituales adoptando valores reducidos de las características mecánicas del hormigón. Estas pueden determinarse sobre testigos extraídos en el hormigón o usando correlaciones con la deformación de expansión libre, si se ha medido esta. La [figura 11](#) muestra dos de tales correlaciones. La [figura 18](#) muestra las correlaciones de la referencia [7].

Conviene hacer algunas precisiones. En primer lugar, si las propiedades mecánicas se obtienen a partir de testigos, hay que tener en cuenta la muy variable afectación que pueden tener distintas zonas y la diferente fisuración que se da en direcciones distintas. La referencia [7] recomienda tomar como mínimo 12 testigos, 4 de zonas muy afectadas, 4 de zonas con daños moderados y 4 de zonas sin daños aparentes. Una estimación basada en un número pequeño, digamos 3, de testigos no tendrá ninguna validez. El ensayo preferente para diagnosticar la presencia de AAR será el de módulo, mientras que la caracterización de las resistencias debe ensayarse a compresión y tracción.

Al evaluar una estructura con hormigón afectado por AAR debe recordarse que este no es solo de un hormigón con una  $f_{ck}$  reducida. El hormigón con AAR es además más heterogéneo y anisótropo, debido a la fisuración según direcciones predominantes, y probablemente con un pretensado inducido. Es un material diferente del hormigón en el que la relación entre  $f_c$  y

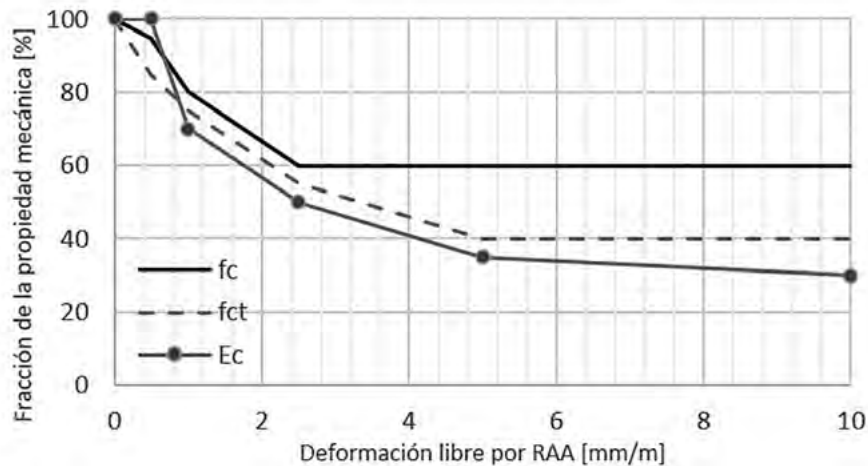


Figura 18. Porcentaje de las resistencias a compresión y tracción y del módulo de deformación de un hormigón afectado por AAR respecto a los valores a 28 días de un hormigón sano para distintas deformaciones de expansión libre.

$f_{ct}$  puede haber cambiado. El hecho de que la resistencia a tracción no aparezca explícitamente en muchas de las fórmulas de cálculo de esfuerzos resistentes no significa que este parámetro no tenga influencia, como en el caso citado del anclaje de las armaduras.

En el análisis debe tenerse en cuenta la susceptibilidad del elemento o la zona de este que se analice a la cual contribuyen la humedad disponible en el entorno, la presencia o no de armado transversal bien anclado y en cuantía significativa y la fisuración desarrollada en la zona, así como el carácter dúctil o frágil del modo de fallo analizado.

#### Condiciones de aptitud al servicio y durabilidad de puentes afectados por AAR

La fisuración por AAR crece paulatinamente con el tiempo, hasta llegar a un punto de equilibrio una vez reaccionado una determinada cantidad del árido reactivo, a no ser que se consiga detener o ralentizar el fenómeno impidiendo la entrada de agua a la masa de hormigón de forma que se evite la regeneración del gel (que continuará formándose mientras el hormigón tenga reservas de sílice reactiva y álcalis) o confinando el hormigón de forma efectiva. En estructuras con grandes aberturas de fisura generadas por la AAR pueden producirse daños por corrosión. Son particularmente sensibles las fisuras de gran abertura que discurren paralelas a la armadura, como las que se desarrollan en la cara inferior de las losas de tableros de puentes (figura 4). En zonas frías pueden producirse saltados del recubrimiento con caída de fragmentos por la combinación de AAR, corrosión y helada. El uso de sales fundentes o el ambiente marino propician la entrada de cloruros en las fisuras y una corrosión acelerada.

El estado límite de deformaciones no suele verse comprometido en puentes con AAR. Por un lado, el descenso en el módulo de deformación aumenta las flechas por cargas gravitatorias pero también las flechas del pretensado, de signo contrario. Por otro lado, el *pretensado químico* de la AAR produce, sobre secciones con armadura asimétrica, curvaturas, y por tanto flechas, de signo contrario al de las cargas gravitatorias.

## 7. CONCLUSIONES

La AAR es un proceso irreversible que genera grandes incertidumbres sobre la seguridad de las estructuras, por lo que resulta necesario mejorar la formación de los inspectores de puentes para que sean capaces de reconocer los síntomas que caracterizan este proceso. Esta voz de alarma permitiría detectar, en un estado todavía no excesivamente avanzado, parte de los casos posibles y evitar una intervención traumática.

Siempre existe, no obstante, la tentación de reaccionar de forma desproporcionada ante la detección de procesos de tipo AAR. Señalamos a este respecto la observación de la guía técnica de la Institution of Structural Engineers [3] de que más del 95% de las estructuras con signos de AAR por fisuración, confirmados por análisis petrográfico, no precisan más intervención que asegurar la impermeabilización, ordenar el drenaje y someter a la estructura a un programa de inspecciones adecuado. Solo cuando los valores de caracterización del hormigón (resistencia a compresión, módulo de elasticidad) son tan reducidos que la evaluación estructural concluye en unos coeficientes de seguridad claramente insuficientes, se deben adoptar medidas más drásticas que pueden llegar a la demolición de la estructura.

No cabe duda de que cada vez más Administraciones españolas son conscientes de este problema y están mejorando sus procedimientos no solo para evitar el colapso de una estructura, sino para mejorar la eficiencia de sus recursos actuando en el momento adecuado.

#### Agradecimientos

Queremos rendir con este artículo homenaje a Luis M<sup>a</sup> Ortega Basagoiti, que fue, en su momento, un precursor de los problemas que afectan a la durabilidad de las estructuras, en una época en la que no existían apenas referentes y en la que el mantenimiento de los puentes apenas estaba empezando a despertar.

## Referencias

- [1] Ministerio de Fomento – Dirección General de Carreteras. (2012) *Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado*.
- [2] 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.
- [3] The Institution of Structural Engineers (1992 con addendum de 2010) Structural effects of alkali-silica reaction. *Technical guidance on the appraisal of existing structures*.
- [4] Nixon, P.J. - Sims, I. (Editors) (2016) *RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures*. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5>.
- [5] FHWA-HIF-09-004. U.S. Department of Transportation. FHWA. (January 2010) *Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures*.
- [6] U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. (2011). *Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook*.
- [7] Morenon, P., Sellier, A., Multon, S., Grimal, E. (2017) Impact of stresses and restraints on ASR expansion. *Construction and Building Materials* · June 2017.
- [8] Jurcut, A-C. (2015) *Modelling of Alkali-Aggregate Reaction Effects in Reinforced Concrete Structures*. Degree Thesis. University of Toronto.
- [9] UNE-EN 12504-1:2020 *Ensayos de hormigón en estructuras*. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión).
- [10] UNE-EN 12390-3 2013: *Ensayos en hormigón endurecido*. Parte 3: determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [11] UNE-EN 12390-13 2013: *Ensayos en hormigón endurecido*. Parte 13: determinación del módulo secante de elasticidad en compresión.
- [12] UNE-EN 12390-1 2013: *Ensayos en hormigón endurecido*. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.
- [13] UNE-EN-12504-4: *Ensayos de hormigón en estructuras*. Parte 4: Determinación de la velocidad de los pulsos ultrasónicos.
- [14] UNE 112011:2011, *Corrosión en armaduras*. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.
- [15] UNE 146508. *Ensayo de áridos*. Determinación de la reactividad potencial álcali-silíce y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero.
- [16] EN 14629 2007: *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón*. Métodos de ensayo. Determinación del contenido en cloruros en el hormigón endurecido.
- [17] UNE 83980. *Durabilidad del hormigón*. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón.