

Premio a la mejor comunicación española para jóvenes profesionales

Problemática de las sales fundentes en la corrosión de armaduras en tableros de puentes y afección a los postesados

The problem of de-icing salts in the corrosion of rebars in bridge decks and their effects on post-tensioned structures

Noemi Corral Moraleda

*Responsable del Área de Rehabilitación
LRA Infrastructures Consulting*

Tomas Ripa

*Socio- Director
LRA Infrastructures Consulting*

El presente artículo desarrolla la problemática del empleo de sales fundentes en la corrosión de armaduras de tableros de puentes y su afección a los postesados. En concreto, se aborda esta problemática en el caso de estructuras afectadas por un proceso de degradación árido-álcali y sin tratamiento de impermeabilización, mediante el ejemplo de dos estructuras concretas cuya reparación se llevó a cabo en el año 2020. En estas estructuras, las tensiones internas por árido-álcali han dado lugar a la formación de fisuras longitudinales en la cara superior del tablero por las que se ha concentrado la penetración de los iones cloruro, lo que ha terminado provocando la rotura frágil de la armadura pasiva y la corrosión de los pretensados. El artículo presenta, asimismo, las conclusiones sobre los mecanismos más probables que han dado lugar a la rotura frágil de las barras.

This article expounds the problem of the use of de-icing salts in the corrosion of steel rebars in bridge decks and its effect on post-tensioning elements. In particular, the paper focuses this problem on structures affected by an aggregate-alkali reaction and without any waterproof treatment, by means of the example of two structures whose repair was carried out in 2020. In these structures, the internal stresses due to the aggregate-alkali reaction have caused longitudinal cracks in the upper face of the deck, through which the penetration of chloride ions has been concentrated, causing, finally, the brittle fracture of the steel bars and the corrosion of the prestressing elements. This article also explains some conclusions about the most probable mechanisms that resulted in the brittle fracture of the steel bars due to the extraordinary and unexpected nature of this phenomenon.

1. Introducción

El empleo de sales fundentes durante las épocas de vialidad invernal provoca, en las estructuras con ausencia de impermeabilización del tablero o con impermeabilizaciones deficientes, el ingreso de iones cloruro por la cara

superior del tablero. Este fenómeno puede verse agravado, asimismo, por la presencia de otras patologías presentes en el hormigón tales como porosidad, coqueras o incluso microfisuración del interior de la masa, que facilita la circulación de los agresivos hasta las armaduras y, en el caso de losas poste-

sadas, el ingreso de los agresivos en el interior de las vainas y la consecuente corrosión de los torones de postesado.

Este fenómeno se ha observado, precisamente, en dos estructuras cuya reparación se ha llevado a cabo en el año 2020; ambas estructuras consis-



Figura 1. Localización de la estructura en el enlace del Nudo de Colmenar

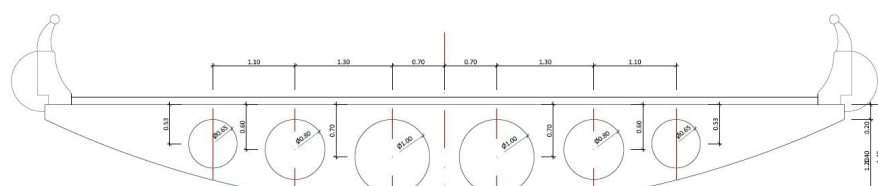


Figura 2. Sección tipo del tablero de la estructura del Nudo de Colmenar

tentes en losas de hormigón postesado con ausencia de impermeabilización del tablero en las que, además, existía un proceso de degradación del hormigón por reacción árido-álcali.

En ambos casos, la patología más relevante que se observó fue la existencia de fisuración de alineación longitudinal en la cara superior del tablero con un elevado número de armaduras transversales seccionadas en la alineación coincidente con las fisuras longitudinales. La forma de rotura de las barras de acero, sin aparente estricción, indicaba una rotura frágil por un fenómeno de corrosión-fatiga. En efecto, el ingreso de cloruros a través de las fisuras actúa como un filo que va seccionando la armadura con el paso del tiempo, reduciendo drásticamente su sección resistente como consecuencia de la corrosión progresiva, lo que, unido a la presencia de otras acciones mecánicas concomitantes, acaba generando la rotura frágil de la sección completa de la barra. [1]

El presente artículo pretende, por tanto, exponer la problemática de las

sales fundentes en la corrosión de armaduras y la afección a los postesados, a partir de las conclusiones obtenidas en los estudios e investigaciones realizados en dos casos concretos, prestando especial atención al fenómeno observado de rotura frágil de las armaduras transversales por lo extraordinario de este fenómeno y ahondando en los mecanismos más probables que han dado lugar a esta patología.

2. Descripción de las estructuras. Problemática detectada

2.1. Descripción de las estructuras

- Viaducto del Nudo de Colmenar (Madrid)

Esta estructura permite la conexión entre la M-607 sentido entrada a Madrid y la M-40 dirección A-1 en el Nudo de Colmenar. (Figura 1)

La estructura discurre por encima de varias infraestructuras entre las

que destacan las carreteras mencionadas (tronco de M-40, M-607 y ramales de enlace), así como vías de Adif, tanto de la red de Cercanías (línea C4) como de Alta Velocidad.

Se trata de un paso superior hiperestático de tipología losa aligerada de hormigón postesado in situ, de planta curva y 561 m de longitud total, que se distribuyen en 17 vanos de luces 20,5 - 32,2 - 35,6 - 37,9 - 56,4 - 32,9 - 36,7 - 39,0 - 28,8 - 29,6 - 36,5 - 28,6 - 30,3 - 32,9 - 33,1 - 28,4 - 21,6 m, según los datos tomados en el levantamiento topográfico realizado en el marco de las obras de reparación de la estructura.

La sección transversal es constante en toda la longitud del tablero, presentando la losa geometría curva con un canto máximo de 1,40 m en eje de tablero y reduciéndose a 0,20 m en borde de tablero por medio de un segmento circular. La sección se compone de un conjunto de seis aligeramientos circulares de diámetro variable entre 0,65 m y 1,00 m. (Figura 2)

El pretensado dispuesto en los vanos no es constante debido a la distinta longitud de los vanos, variando desde 9 tendones de 15 Ø 0,6" en los vanos cortos hasta 16 tendones de 19 Ø 0,6" en los vanos de mayor luz.

- Estructura de la carretera SG-20 (Provincia de Segovia)

Esta estructura se localiza en el pk. 3+410 de la carretera SG-20, en la provincia de Segovia. Se trata de una estructura de 97 metros de longitud que resuelve el cruce de la carretera SG-20 sobre la glorieta que conecta la N-110, la SG-20 y la carretera de acceso a Segovia. (Figura 3)

La estructura, de planta recta, consiste en una losa postesada de 4 vanos con distribución de luces 21,00+27,50+27,50+21,00 metros. Por su parte, la sección transversal es constante en toda la longitud del tablero, de tipo losa postesada forma-



Figura 3. Localización de la estructura de la carretera SG-20

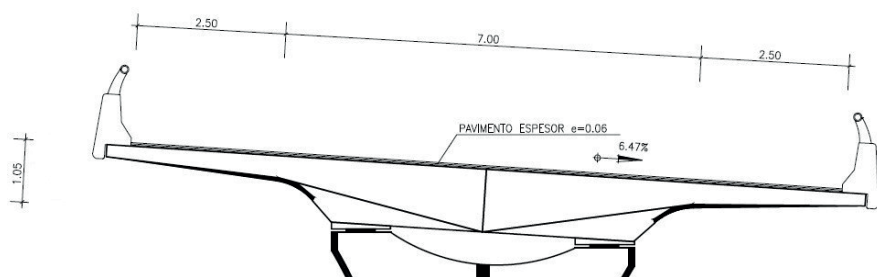


Figura 4. Sección tipo del tablero de la estructura de la carretera SG-20

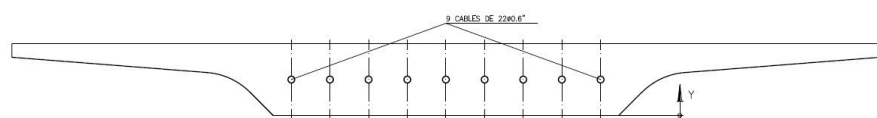


Figura 5. Sección tipo de pretensado en la estructura de la carretera SG-20

da por un núcleo de hormigón de 7,00 m de anchura y voladizos laterales de 2,50 m. (Figura 4)

El pretensado dispuesto en la estructura está formado por 9 tendones de 22 Ø 0,6", constante en toda la longitud de la estructura y trazado curvo coincidente con la distribución de momentos flectores. (Figura 5)

2.2. Patologías detectadas en la fase inicial

La evaluación del estado de conservación de una estructura y la detección temprana de daños requiere la realización de inspecciones programadas y sistematizadas, que permitan conocer el nivel de prestaciones de una estructura en un momento dado. Por ello, es esencial establecer una estrategia de conservación que, además de otros aspectos, establezca los niveles de

inspección y la frecuencia con la que se realizan las mismas. En este sentido, se pueden definir varios niveles de inspección en función del personal que las realiza, los medios que se emplean y la frecuencia con la que se llevan a cabo. Si bien no es objeto del presente artículo ahondar en las fases que conforman la gestión de la conservación de las estructuras, sí se quiere poner de manifiesto la importancia de la realización de inspecciones programadas y sistematizadas, por cuanto son un aspecto fundamental para la detección

temprana de patologías y constituyen el punto de partida de las fases de estudio y evaluación posteriores.

En el caso de las estructuras objeto de estudio, la primera alarma sobre el estado de conservación se produce en el marco de estos trabajos de inspección programados; así, en el caso de la estructura del Nudo de Colmenar, durante la inspección principal (inspección visual por técnicos especialistas en estructuras, sin medios especiales de acceso y que se realiza cada 4 años) se advirtieron flechas excesivas en algunos vanos y fisuración abundante en el tablero, mientras que en el caso de la estructura de la carretera SG-20, fue por medio de una inspección rutinaria (inspección visual por técnicos de conservación) durante los trabajos de repavimentación de la estructura, la que detectó las grietas existentes en el tablero. De esta manera, la detección de los daños anteriores en el marco de las inspecciones programadas constituye la primera alarma sobre el estado de conservación de estas estructuras y es lo que da pie a la fase de evaluación posterior, en la que se realiza una inspección visual detallada por ingenieros especialistas en patología estructural y una campaña de auscultación y ensayos, con objeto de determinar el alcance real de las patologías detectadas y valorar sus implicaciones en el índice de seguridad estructural.

Los deterioros identificados en la fase de inspección visual detallada que pusieron de manifiesto la existencia de un proceso patológico grave fueron, fundamentalmente, la presencia de un proceso de degradación del

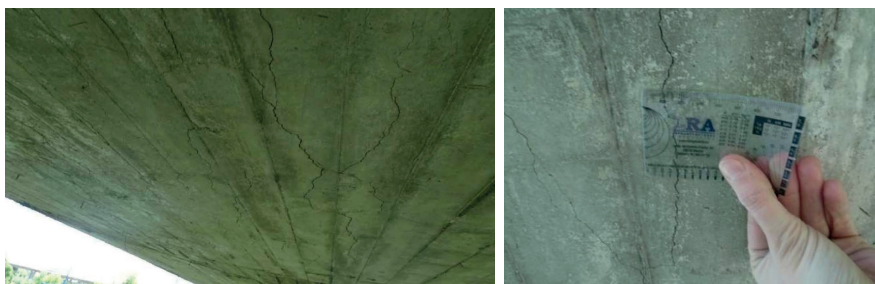


Figura 6. Fisuración longitudinal en la cara inferior del tablero (Estructura del Nudo de Colmenar)

hormigón por reacción árido-álcali que se manifestaba en una serie de daños particulares, el seccionamiento de las barras de armado transversal de la cara superior del tablero y defectos de inyección de las vainas de postesado.

El **proceso de degradación del hormigón por reacción árido-álcali** se manifestaba en los siguientes daños observables:

- Abundante fisuración longitudinal en la superficie inferior de la sección, orientada de forma paralela a las compresiones principales del pretensado. Esta fisuración en la parte inferior del tablero solo se observó en la estructura del Nudo de Colmenar, seguramente porque en el caso de la estructura de la carretera SG-20, y como se verá más adelante, el proceso de degradación del hormigón por reacción árido-álcali se encontraba en una fase más temprana. (Figura 6)
- Flechas verticales acusadas en el caso de la estructura del Nudo de Colmenar, especialmente en tres vanos: vano 5 (vano de mayor luz sobre la M-40) y vanos 8 y 11. La deformación de estos vanos apuntaba a una pérdida de rigidez del hormigón como consecuencia de la degradación por árido-álcali. Nuevamente, esta pérdida de rigidez del hormigón a través de la deformada no se percibió en la estructura de la SG-20, al encontrarse en un estadio más inicial del proceso de deterioro. (Figura 7)
- Fisuras longitudinales en la cara superior del tablero coincidentes con la dirección de los pretensados. Estas fisuras se observaron tras el fresado del pavimento en ambas estructuras, si bien eran más abundantes en la estructura del Nudo de Colmenar. (Figura 8)

En el caso de la estructura de la SG-20 la fisuración de la cara superior del tablero se llegaba a reflejar

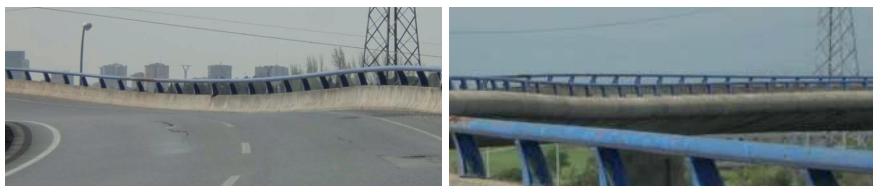


Figura 7. Flechas acusadas apreciables en los vanos 5 y 8 de la estructura del Nudo de Colmenar



Figura 8. Fisura longitudinal observada en la cara superior del tablero (A la izquierda, estructura de la carretera SG-20; a la derecha, estructura del Nudo de Colmenar)



Figura 9. Reflejo en el pavimento de una de las grietas existentes en el tablero (Estructura de la carretera SG-20)



Figura 10 – Fracturación interior de la masa de hormigón en uno de los testigos extraídos en la estructura de la carretera SG-20ra SG-20)



Figura 11. Aureolas blanquecinas observadas alrededor de los áridos de los testigos extraídos sin necesidad de microscopía (A la izquierda, estructura de la carretera SG-20; a la derecha, estructura del Nudo de Colmenar)

en algunas zonas del pavimento (Figura 9)

Asimismo, en ambas estructuras, además de las grietas observadas en la cara superior del tablero, se extrajeron testigos en la alineación

de las fisuras con fracturación interior de la masa de hormigón (Figura 10)

- Asimismo, en el examen visual de los testigos extraídos en la alineación de las fisuras, se observó la



Figura 12 – Detalle de las barras seccionadas en la estructura del Nudo de Colmenar



Figura 13. Barras seccionadas en la estructura de la carretera SG-20



Figura 14. Aspecto del óxido observado en uno de los testigos extraídos en la traza de la fisura para su examen visual



Figura 15. Chequeo de los tubos de purga para comprobación de la colmatación de los mismos (Estructura de la SG- 20)

presencia de una aureola blanca alrededor de algunos áridos, compatible con la formación de gel de sílice de naturaleza expansiva, resultado de la reacción árido-álcali (Figura 11)

Por otro lado, se observó el seccionamiento de las barras de armado transversal con una alineación de rotura coincidente con algunas de las grietas longitudinales y con apariencia macroscópica de rotura frágil. Para la observación de las armaduras, se realizaron pequeñas calas en la alineación de las grietas (Figura 12 y 13).

Este tipo de rotura de tipo frágil es, probablemente, el daño más relevante observado en las estructuras objeto de estudio por lo extraordinario del fenómeno. En este sentido, el acero para armar se trata de un material dúctil, por lo que el hecho de haber experimentado una rotura frágil solo parece compatible con un fenómeno de corrosión-fatiga, que sugiere la existencia de un ataque localizado de corrosión por cloruros provenientes de los tratamientos de vialidad invernal y que penetran fácilmente en el interior de la masa de hormigón a través de las grietas existentes en la cara superior del tablero hasta alcanzar las armaduras. En el examen visual de los testigos extraídos en la estructura de la provincia de Segovia, se ha observado un óxido muy poco viscoso, que incluso en alguna etapa del proceso de corrosión ha debido ser completamente líquido por la elevada migración que se observa del óxido a las zonas de hormigón circundante, lo cual solo es compatible con la presencia de corrientes eléctricas en la estructura o con la presencia de agua en circulación con altas concentraciones de cloruros. No obstante, el puente carece de iluminación y, por tanto, no parece posible que haya corrientes erráticas o vagabundas, lo que apuntaría a un ataque localizado por cloruros. (Figura 14)

Por último, se observaron indicios de posibles defectos de inyección de las vainas de postesado al examinar los tubos de purga descubiertos en la zona fresada, mediante la introducción en su interior de una cinta métrica o un destornillador para verificar si estos se encontraban colmatados. En este chequeo previo se observó que varios de los tubos de purga no estaban inyectados de lechada hasta la cara superior de la losa y que, por tanto, sería probable que pudiera existir una inadecuada inyección de las vainas de pretensado, lo que dió pie a la posterior inspección con boroscopio en la campaña de auscultación y ensayos que se lleva a cabo en las estructuras. (Figura 15)

Además de las patologías anteriores, hay que señalar que en ninguna de las estructuras se observó la presencia de ningún tratamiento de impermeabilización en la cara superior del tablero, lo que contribuye ciertamente a agravar y acelerar cualquier proceso de degradación de la estructura.

De esta forma, los daños anteriores, detectados en la fase de estudio inicial del estado de conservación las estructuras, apuntan a la existencia de un proceso de degradación del hormigón por reacción árido-álcali, que ha dado lugar a una fisuración longitudinal abundante, parte de la cual se ha observado en la cara superior del tablero de ambas estructuras y, en el caso de la estructura del Nudo de Colmenar, importantes flechas verticales causadas por la pérdida de rigidez del hormigón característica de fases avanzadas del proceso de degradación árido-álcali.

Asimismo, y como se verá más adelante, la rotura de las barras de armado transversal superior en ambas estructuras, con apariencia de rotura frágil y con una alineación de rotura coincidente con las fisuras longitudinales observadas, sugiere que la rotura de las barras es consecuencia de

un fenómeno de corrosión-fatiga, en el que la corrosión se produce como consecuencia del ingreso de cloruros procedentes del empleo frecuente de sales fundentes a través de las grietas de la losa y la presencia de las cargas cíclicas de tráfico.

Por otro lado, el empleo de sales fundentes en losas postesadas sin tratamiento de impermeabilización, puede contribuir a la progresión de daños graves en el pretensado como la corrosión o incluso la rotura de los alambres que, si bien se trata de defectos no observables en las fases iniciales de inspección, es posible detectarlos por medio de una inspección con boroscopio en las fases de auscultación posteriores, tal como se detalla en los siguientes epígrafes.

3. Investigación y auscultación realizada

La identificación de los deterioros anteriores en la fase de estudio inicial por medio de una inspección visual detallada da lugar a la realización de una campaña de auscultación e investigación de las estructuras, de cara a ratificar las hipótesis iniciales y determinar el grado de afección real de las patologías detectadas en el índice de seguridad estructural. Estas investigaciones consistieron, fundamentalmente, en lo siguiente:

- Determinación de las características mecánicas del hormigón (módulo de deformación y resistencia), analizando su composición y con observación por microscopía electrónica.

En ambos casos, los resultados confirmaron la existencia de reacción árido-álcali en todos los testigos extraídos. (Figura 16)

En el caso del Puente de Colmenar, en todas las probetas extraídas se observaron en mayor o menor medida áridos fracturados y parcialmente alterados por procesos de degradación química, observando presencia de poros e interfaces árido-pasta colmatados con depósitos blanquecinos. Por otro lado, en el caso de la estructura de la carretera SG-20 se determinó que, por el tamaño y forma de los cristales observados, la reacción árido-álcali se encontraba en un estado incipiente pero ya consolidado.

Asimismo, se determinó una pérdida media del módulo de rigidez en los testigos extraídos en el Puente de Colmenar del 54%, mientras que en la estructura de la SG-20 no se observó una pérdida significativa del mismo.

- Determinación del contenido en cloruros y otros procesos de ataque químico al hormigón, observando un contenido muy elevado de cloruros en algunos de los testigos extraídos en el Puente de Colmenar (1,57% referido al hormigón, en peso, frente a un 0,2% admisible según la EHE-08) y un porcentaje inferior al máximo permitido en el caso de los testigos analizados en el puente de Segovia, un hecho que resulta incompatible con la presencia de óxido poco viscoso y el alto grado de disolución de las armaduras observado, por lo que



Figura 16. Aspecto de los geles detectados en la microscopía (A la izquierda, estructura del Nudo de Colmenar, a la derecha, estructura de la carretera SG-20)

se trata de un aspecto a analizar en el futuro en el puente reparado.

En este sentido, la investigación de la penetración de cloruros adquiere especial importancia en el caso de tableros de losas postesadas en la medida en que puedan afectar a los pretensados de la estructura, especialmente cuando estos presentan deficiencias en la inyección y otros defectos de ejecución como se verá más adelante. La ausencia de un tratamiento de impermeabilización adecuado del tablero resulta, asimismo, un factor determinante en estos casos.

- Además del chequeo de los tubos de purga realizado en la fase inicial y la realización de calas para el examen visual de algunas zonas de las vainas, se realizó una inspección de los cables de postesado por medio de boroscopio para evaluar el estado de la inyección y de los torones de pretensado.

Las principales patologías que se detectaron en esta inspección fueron conexiones incorrectas entre los tubos de purga y las vainas (falta de taladro en la vaina), relleno de la vaina incompleto en diferente grado según las zonas dejando cordones sin protección tanto en puntos altos como en tramos adyacentes, cordones corroídos e incluso rotos por corrosión bajo tensión, exudación de lechada, etc. Asimismo, se observó que las cotas de trazado en los puntos altos eran diferentes a las de proyecto, con un desplazamiento vertical del eje del tendón respecto a la cota teórica de hasta 220mm en el caso del puente del Nudo de Colmenar. (Figura 17)

Nuevamente, si bien los defectos detectados en las vainas de pretensado eran similares en las dos estructuras, la cantidad, extensión y grado de avance era mayor en el Puente de Colmenar, incluso con

defectos que ponían de manifiesto una mala praxis en la ejecución del pretensado, como la presencia de tubos de purga simplemente apoyados sobre la vaina que carecía de orificio de conexión con el tubo. (Figura 18)

4. Evaluación de los resultados

La inspección visual detallada llevada a cabo junto con la campaña de auscultación y ensayos realizada permitió detectar y ratificar la existencia de una serie de patologías graves en las estructuras objeto de estudio, las cuales, además de ser más numerosas en el Puente de Colmenar, se encontraban en un estadio más avanzado del proceso de deterioro y eran concomitantes con otras patologías debidas a incidencias durante la ejecución, que no son el objeto fundamental del presente artículo. En este sentido, las patologías más relevantes detectadas en las estructuras y que, por sí mismas, constituyen una problemática grave en tableros de losas postesadas de hormigón por sus implicaciones en la seguridad estructural, son las siguientes:

- Proceso de degradación del hormigón por reacción árido-álcali, contaminación por cloruros procedentes del empleo de sales fundentes y ausencia total de impermeabilización del tablero.
- Rotura sistemática de las barras de armadura pasiva transversal superior por un proceso de corrosión-fatiga.
- Daños en los torones de pretensado, más o menos graves según la estructura, con una patología de corrosión bajo tensión y la consiguiente rotura de varios alambres.

Las patologías anteriores suponen, por tanto, una afección significativa

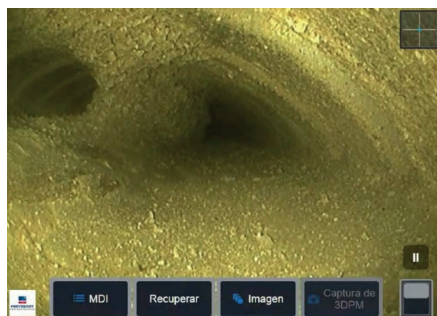


Figura 17. A la izquierda, cordones corroídos e hilos rotos; a la derecha, consistencia anormal de lechada con formación de espuma (Estructura del Nudo de Colmenar)



Figura 18. Falta de conexión entre tubo de purga y vaina de pretensado (Estructura del Nudo de Colmenar)

tiva a las condiciones de seguridad de la estructura, en mayor o menor grado en función de su extensión y grado de evolución. No obstante, si bien las estructuras objeto de estudio presentaban otros deterioros menores, se han destacado los anteriores por la estrecha relación que se llega a deducir entre ellos y por lo extraordinario e inesperado del fenómeno de rotura frágil de las barras de armado transversal, que se describe más adelante.

Así pues, el proceso de deterioro de la estructura comienza con un hormigón sensible a la reacción árido-álcali, es decir, áridos potencialmente reactivos (sílice reactiva) que, en presencia de agua y los álcalis de la pasta de cemento, dan lugar a la formación de un gel expansivo que produce tensiones internas en la masa de hormigón. En este sentido, la ausencia de un tratamiento de impermeabilización del tablero juega un papel determinante en la activación de la reacción árido-álcali, ya que para que esta se produzca es necesaria la aportación de agua (normalmente de una fuente externa); por lo que, en ausencia de agua, es decir, con una correcta impermeabilización del tablero, es posible frenar, o incluso llegar a paralizar, esta reacción.

Las tensiones internas que se producen en el hormigón como consecuencia de la reacción anterior, provoca la aparición de fisuras que, si bien en un elemento masivo o modelo idealizado formarían una red de fisuración homogénea y multidireccional, en los elementos resistentes como tableros de puente, la orientación de esas fisuras está condicionada por la geometría del elemento y la orientación de los esfuerzos. De esta forma, en las dos estructuras objeto de estudio, estas fisuras presentaban un trazado longitudinal, es decir, fisuras paralelas a las isostáticas de compresión.

La formación de las fisuras longitudinales, con grandes aberturas de fisura (fuera de los límites normativos) provoca, junto con la ausencia de un tratamiento de impermeabilización adecuado del tablero, el ingreso de cloruros a la estructura procedentes de las sales fundentes empleadas en los trabajos de vialidad invernal, facilitando de esta manera los procesos de corrosión de la armadura pasiva y de los torones de postesado.

En efecto, en los dos casos de estudio las barras de armado transversal superior presentaban roturas de la sección completa y de apariencia frágil. En este sentido, si bien las roturas de elementos de acero por un proceso de corrosión bajo tensión es un fenómeno ciertamente habitual, en los casos del Puente de Colmenar y el de la carretera SG-20, las roturas observadas son completamente diferentes a las formas de rotura habitual por contaminación por cloruros, que se presenta como una corrosión local que progresa hacia el interior en forma de cono invertido.

En estas estructuras, las barras mostraban una apariencia macroscópica de rotura frágil que apuntaba a la presencia de acciones mecánicas concomitantes al ataque por cloruros [1]. Si bien, a día de hoy, se siguen analizando las roturas detectadas en las barras por medio de ensayos y análisis en laboratorios especializados, la hipótesis más probable que se baraja es que se trate de un fenómeno de corrosión-fatiga, en el que se produce el agrietamiento del elemento metálico por la acción simultánea de una tensión cíclica y la presencia de un medio agresivo que provoca la corrosión localizada del acero. En efecto, la presencia de cargas cíclicas asociadas al tráfico en las estructuras, provocaría el avance del frente de fisuración en la picadura de la barra de acero provocada por la penetración de cloruros. En este caso, a diferencia de los procesos de

corrosión bajo tensión, en los que es necesario la presencia de una tensión permanente -o estática- (como en el caso de los cables de pretensado) para que se produzca la rotura del material, en los procesos de corrosión-fatiga esta tensión debe ser cíclica. En los casos de estudio, no parece razonable achacar la rotura de las barras a un fenómeno de corrosión bajo tensión, por cuanto no se trata de barras con un nivel alto de sollicitación y, en ese caso, el plano de rotura tendría apariencia de rotura cuasi-frágil.

Por último, el ingreso de cloruros a través de las grietas longitudinales, agravado por la ausencia de un tratamiento de impermeabilización y los defectos de inyección de las vainas de pretensado, provoca que la corrosión llegue a los cables de pretensado en ciertas secciones, originando incluso la rotura de algunos torones, esta vez sí, por corrosión bajo tensión. Asimismo, es preciso señalar que en cualquier inspección que se realice del pretensado en una estructura, existe un elevado grado de incertidumbre sobre la fiabilidad del estado de conservación al tratarse de un elemento que no es accesible para su inspección en el 100% de la longitud y, por tanto, es preciso considerar esta incertidumbre en la evaluación del estado de conservación que se realiza de la estructura y en la propuesta final de reparación que se realice en última instancia.

5. Estrategias para la prevención y reparación

Las patologías anteriores constituyen una problemática grave en los tableros de puente de losas postesadas. No obstante, para que estas patologías se produzcan es necesaria la confluencia de varios factores (Figura 19).

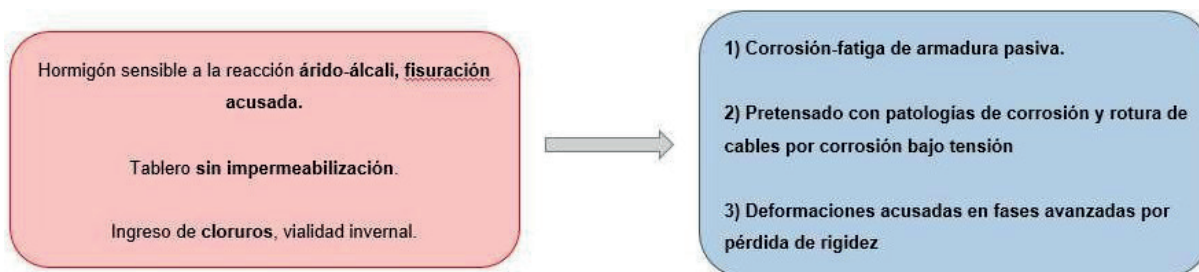


Figura 19.

La ausencia de una adecuada impermeabilización del tablero que impida la entrada de agua en la estructura y la penetración de los cloruros procedentes del empleo de sales fundentes, juega un papel determinante en el progreso de las patologías anteriores. En este sentido, para que se dé la reacción álido-álcali, además de la presencia de sílice reactiva y álcalis, es necesaria la presencia de agua que provenga de una fuente externa. Así, la reacción cesará cuando uno de los reactivos anteriores se consuma.

Por otro lado, los procesos de corrosión de la armadura pasiva y los torones de pretensado, necesitan la presencia de un medio agresivo para prosperar. En este caso, la ausencia de un tratamiento de impermeabilización del tablero facilita la penetración de los iones cloruro al interior de la estructura, agravándose este proceso en las zonas del tablero previamente fisuradas, donde se incrementa la velocidad de corrosión por el alto porcentaje de ingreso de cloruros que se produce a través de las fisuras.

En virtud de lo anterior, es sencillo deducir que la ejecución de impermeabilizaciones adecuadas en la fase de ejecución de las estructuras es un factor determinante para evitar la progresión de las patologías anteriores. No obstante, en estructuras existentes con falta de impermeabilización o impermeabilizaciones deficientes, en las que los daños ya han progresado y han dado lugar a una evolución patológica, se debe optar por estrategias de reparación basadas en la restitución de las zonas afectadas y el encapsulamiento completo de la estructura. En este caso, una adecuada estrategia de reparación consistiría en lo siguiente:

- Hidrodemolición del tablero hasta descubrir la armadura transversal afectada, reposición de la armadura y reconstrucción con hormigón de árido fino hasta la cota inicial.
- Reinyección de las vainas de pretensado mediante una inyección al vacío por medio de una lechada fluida con inhibidor de corrosión

que mejore significativamente la durabilidad.

- Ejecución de una capa de hormigón de ultra altas prestaciones (UHPCFR) para el encapsulamiento de la estructura de, aproximadamente, 3 cm para la mejora significativa de las prestaciones de la estructura en términos de durabilidad debido a su elevada compacidad y a la ausencia casi total de poros. Además, proporciona una mejora adicional del comportamiento de la estructura frente a flexión transversal al constituir un material de elevadas prestaciones mecánicas (hasta 150 MPa de compresión y 12 MPa de flexotensión) y comportamiento resistente multidireccional.

En el caso particular de las estructuras objeto de estudio, a la vista de las patologías detectadas y considerando su extensión y grado de evolución, se adoptaron las siguientes decisiones en cuanto a su reparación.

En el caso de la estructura del Nudo de Colmenar, debido a las pa-

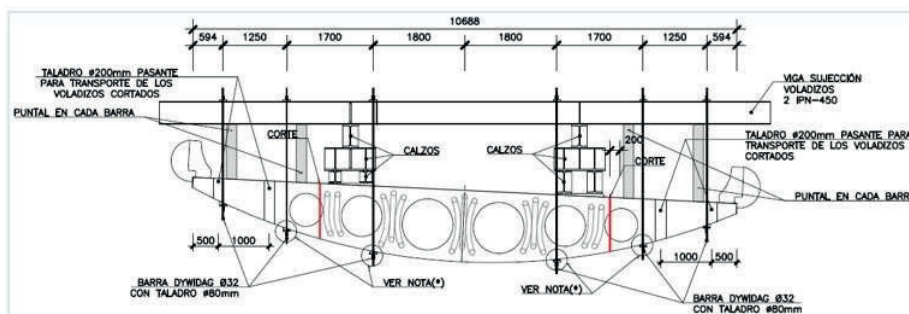


Figura 20. Desmontaje del tablero existente



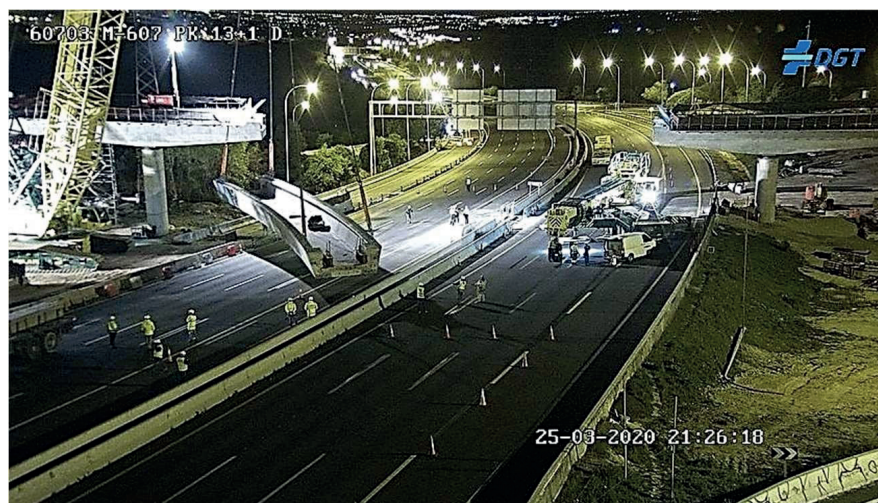


Figura 21. Montaje del nuevo tablero sobre las calzadas de la M-40

tologías detectadas, su extensión y grado de evolución y, en última instancia, los graves daños detectados en el pretensado, se concluyó que la alternativa más razonable era la demolición íntegra del puente y posterior reconstrucción con un nuevo tablero prefabricado de hormigón.

Por el contrario, en el caso de la estructura de la carretera SG-20, en la que los resultados de las inspecciones y ensayos realizados determinaron que se encontraba en una fase más temprana del proceso de deterioro, y no habiendo detectado daños alarmantes en el pretensado, se optó por una estrategia de reparación de la estructura basada en la estrategia de reparación anterior: reposición de las armaduras seccionadas, reconstrucción de las zonas de hormigón fisuradas, reinyección de las vainas de pretensado y encapsulamiento completo del tablero para evitar la entrada de agentes agresivos al interior de la estructura.

6. Conclusiones

Las patologías observadas en las estructuras objeto de estudio constituyen una problemática grave que ha progresado debido a la confluencia de varios factores. La ausencia de un tratamiento de impermeabilización en

la estructura ha facilitado la penetración de los iones cloruro procedentes del empleo de sales fundentes así como la degradación del hormigón por reacción árido-álcali y los procesos de corrosión de la armadura pasiva y los pretensados.

En este proceso de degradación, las tensiones internas generadas por la reacción árido-álcali han dado lugar a la aparición de fisuras longitudinales en la cara superior del tablero en las que se han concentrado las sales de deshielo que han facilitado los procesos de corrosión de la armadura pasiva y de los cables de pretensado. La propagación de este medio agresivo junto con las cargas mecánicas concomitantes ha provocado la rotura frágil de las barras de armado transversal. Si bien actualmente se están llevando a cabo investigaciones en laboratorios especializados para determinar los mecanismos más probables de rotura, todo apunta a un fenómeno de corrosión-fatiga, en el que las cargas cíclicas de tráfico son las que inducen la propagación del frente de fisuración con la carga tensional añadida de la expansión del hormigón por la reacción árido-álcali.

Asimismo, si bien se trata de una patología que se ha observado de manera reciente en las estructuras presentadas en el artículo, no se tra-

ta de un fenómeno excepcional, sino que, a raíz de su identificación en el Puente de Colmenar, se ha observado en otros puentes de tipología similar.

Las patologías anteriores son resultado de la confluencia de varios factores, no obstante la presencia de agua juega un papel determinante en el proceso de deterioro. En este sentido, una estrategia de conservación adecuada pasa por minimizar la entrada de agua en la estructura a lo largo de la vida en servicio. Por ello, la ejecución de tratamientos de impermeabilización de altas prestaciones en las fases de construcción es un aspecto clave para evitar la progresión de las patologías anteriores y sus efectos en la seguridad estructural que, en casos como el del Puente de Colmenar, pueden llegar a ser irreversibles. Igualmente, en estructuras existentes sin tratamiento de impermeabilización en las que estas patologías ya han progresado, es posible ralentizar la velocidad de deterioro adoptando medidas enfocadas a restituir las zonas deterioradas y encapsular la estructura mediante el empleo de hormigones de ultra altas prestaciones. No obstante, en este caso será imprescindible realizar una campaña de auscultación y ensayos de cara a determinar la magnitud, extensión y grado de evolución de las patologías detectadas y valorar la incertidumbre sobre la fiabilidad del estado de conservación de toda la longitud del pretensado, al ser un elemento esencial para la seguridad estructural del puente e inaccesible para ser auscultado.

Referencias

- [1] Andrade Perdrix, C. (2020). Informes sobre las causas de los daños en las estructuras del Nudo de Colmenar y de la carretera SG-20. ❖