

Colapso del puente del Guadarrama en la M-527. Autopsia y enseñanzas



The Collapse of the Bridge Over the Guadarrama River in the M-527 Road. Autopsy and Teachings

Belén Peña

*Ing. de Caminos, Canales y Puertos.
Dirección General de Carreteras.
Comunidad de Madrid.
Jefe de Área de Conservación y
Explotación de Carreteras.*

Pedro Berruezo

*Ing. de Caminos, Canales y Puertos.
Dirección General de Carreteras.
Comunidad de Madrid.
Subdirector General de Construcción,
Conservación y Explotación*

Javier León

*Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.
ETS de Ingenieros de Caminos, C. y P. UPM.*

Resumen

El 29 de mayo de 2015 se hundió el puente que proyectara el insigne ingeniero Alfredo Páez en 1957. Una sencilla estructura de vigas, de apenas 18 m de luz, pero singular en sus formas y en su proceso constructivo. Una estructura de gran valor patrimonial, aunque desconocido, por los valores técnicos que encerraba y que prestó servicio durante 57 años sin incidencia alguna. Su colapso fue noble, dúctil, advirtiendo de su final. En este artículo se presentan las conclusiones de la autopsia y algunas reflexiones acerca de las enseñanzas que cabe extraer para la gestión del patrimonio de puentes.

Abstract

On May 29th 2015 collapsed the bridge designed in 1957 by the eminent engineer Alfredo Páez. A rather simple deck, simply supported, made up of prestressed segmental beams 18 m span and a top slab, very original in forms and erection procedure. A structure of important, although not recognised, technical virtues that completed 57 years of service without symptoms or apparent problems. The collapse was noble, ductile, announcing its end. The main conclusions derived after the autopsy and some thoughts related to the management of the bridge heritage are presented.

1. Ámbito y propósito

El 29 de mayo de 2015 se hundió el puente que, en 1957, proyectara el insigne ingeniero Alfredo Páez. Una sencilla estructura de vigas, de apenas 18 m de luz, pero singular en sus formas y en su proceso constructivo. Una estructura de gran valor patrimonial por los valores técnicos que encerraba y que prestó servicio durante 57 años sin incidencia alguna. Su colapso fue noble, dúctil, advirtiendo de su final y con lecciones que los autores de este artículo quieren extraer para que aprendamos los ingenieros responsables del mantenimiento. En ese sentido, se presentan en este artículo los resultados más significativos de la autopsia realizada.

Conviene admitir que el aludido “valor patrimonial” [2] es un concepto difuso porque se entremezclan conceptos estéticos, utilitarios, científicos, históricos, paisajísticos, económicos, sociológicos, políticos y simbólicos. Afecta a aspectos tangibles, no siempre cuantificables, y a aspectos intangibles, casi nunca cuantificables. La referencia [3] contiene, a estos efectos, una propuesta de acercamiento a este concepto que concita los tres principios vitruvianos [4] de Belleza (*Venustas*), Firmeza (*Firmitas*) y la Utilidad (*Utilitas*) o función. Esta estructura parecía exhibir un sobrio equilibrio entre las tres virtudes, sin sobrepasar ninguna de ellas a las otras dos, pero no era del todo así. La *Firmitas* estaba muy comprometida por culpa de la corrosión de las armaduras de pretensado, a pesar de que no había síntomas realmente alarmantes.



Figura 1. Rembrandt van Rijn, La lección de Anatomía de Nicolaes Tulp (1632, 169,5 x 216,5 cm. Mauritshuis, La Haya, Holanda)

2. Ubicación y descripción de la estructura

La estructura se hallaba en el PK 1+600 de la carretera M-527 (fig. 2 y 3) que administra la Comunidad de Madrid, entre la N-VI y el enlace con la carretera que une El Escorial y Guadarrama, a la entrada del Valle de los Caídos.

La estructura estaba inventariada con el código 0459 en el sistema de gestión de la Comunidad de Madrid, y había sido inspeccionada en 2007, con una calificación global aceptable, salvo deterioros que se juzgaron menores.

Tras el colapso se buscó toda la información disponible del puente, obteniéndose los datos siguientes². En primer lugar, la sucinta ficha del puente en la referencia [5], que sitúa a esta estructura entre las más antiguas de las obras de hormigón pretensado de España (fig. 4). En segundo lugar, los datos que pueden extraerse de la referencia [6], del CEHOPU, de extraordinario valor en este caso. En efecto, este trabajo de autopsia ha sido posible gracias al mérito de quienes archivaron esta información y la pusieron a disposición pública.

La estructura, según los planos del proyecto original [6], era como se muestra en la fig. 5: un tablero de 13 vigas de longitud total 18,30 m y luz libre entre intradós de estribos de 17,00 m, con rasante horizontal.



Figura 2. Ubicación de la estructura



Figura 3. Vista de la estructura en sentido creciente de los PK hacia el oeste (Google Earth) pocos meses antes del colapso

¹ La autopsia (fig. 1) fue siempre fuente de enseñanzas en el ámbito de la Medicina y campo fuente para la analogía metafórica [1], de gran valor pedagógico.

² Fue el ingeniero de caminos D. Juan Jesús Álvarez quien alertó a los autores de este artículo de la singularidad de la obra y de la existencia de la ficha de este puente en la publicación [5].

Autores del proyecto: Lamberto de los Santos y Alfredo Páez

Empresa del proyecto: A.M.S.A.

Sistema: Barredo

Fecha de la construcción: 1958

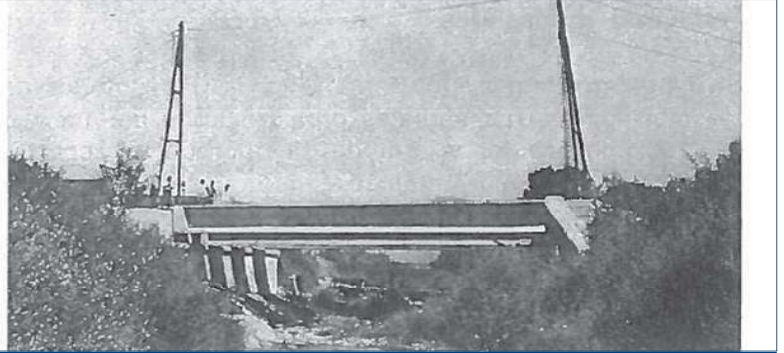


Figura 4. Extracto de la ficha del puente según [5]

Las vigas presentaban una sección transversal singular y tenían otra particularidad para la época: no había riostras, de forma que el reparto transversal quedaba confiado a la rigidez de la losa superior, pretensada transversalmente. La fig. 6 muestra el pretensado longitudinal y, con más detalle, la forma de la sección transversal, en la que las protuberancias que se advierten en la parte superior de las alas, de trasdós curvo presumiblemente para ahorrar peso y ganar en superficie adherente, eran cantos rodados de 6 cm insertados en la masa aún fresca del hormigón de las dovelas de las vigas prefabricadas, con el fin de mejorar la capacidad frente a esfuerzo rasante de conexión viga-losa. A dicha conexión contribuían igualmente barras (lisas, como el resto de las armaduras pasivas) Ø8 cada 0,24 m en sentido longitudinal de cada viga. Cada una de las 13 vigas, idénticas, estaba formada por dovelas de 1,20 m de longitud enlazadas longitu-

dinalmente entre sí por alambres de pretensado dispuestos con trazado rectilíneo dentro de cada dovela, pero con sus vértices, en los puntos de encuentro entre dovelas, dispuestos a lo largo de una parábola de segundo grado.

En la fig. 7 se muestra la configuración de los estribos, de hormigón en masa de carácter ciclópeo y unas impostas rotundas formadas por piezas de granito. Merece la pena destacar que el estribo 1 (el situado al este, hacia Villalba) actuaba de punto fijo y en él se apoyaban las vigas sobre unas láminas de plomo que no se han encontrado en el proceso de demolición, mientras que en el lado oeste (estribo 2) el tablero apoyaba sobre unos péndulos, que eran unos prismas octogonales apoyados sobre una lámina de plomo en el altar del estribo, que presentaba unos cajeados para albergar tales piezas, y otra lámina de plomo dispuesta en la parte alta, en la que apoyaban las vigas.

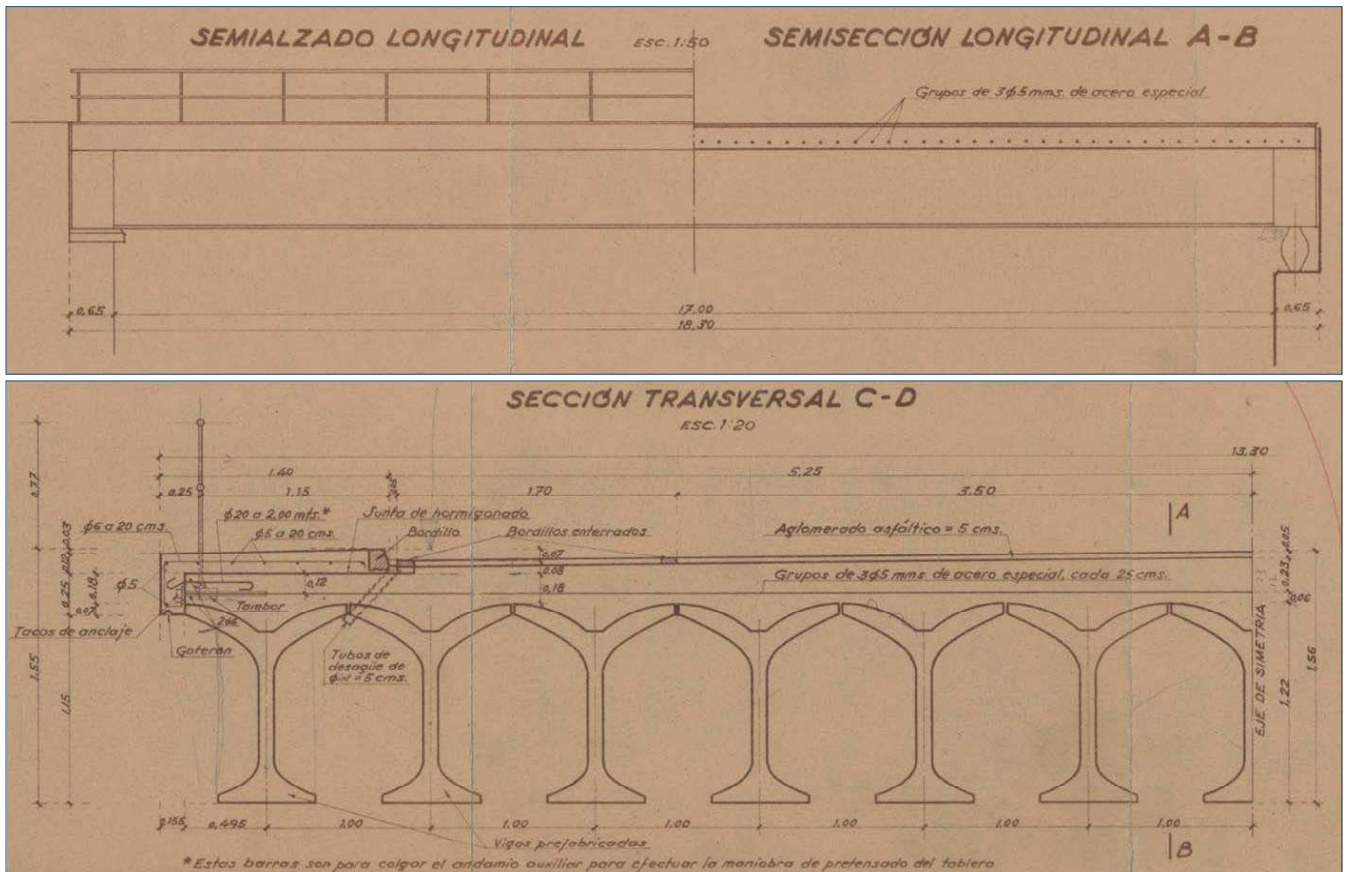


Figura 5. Alzado y sección transversal del puente [6]

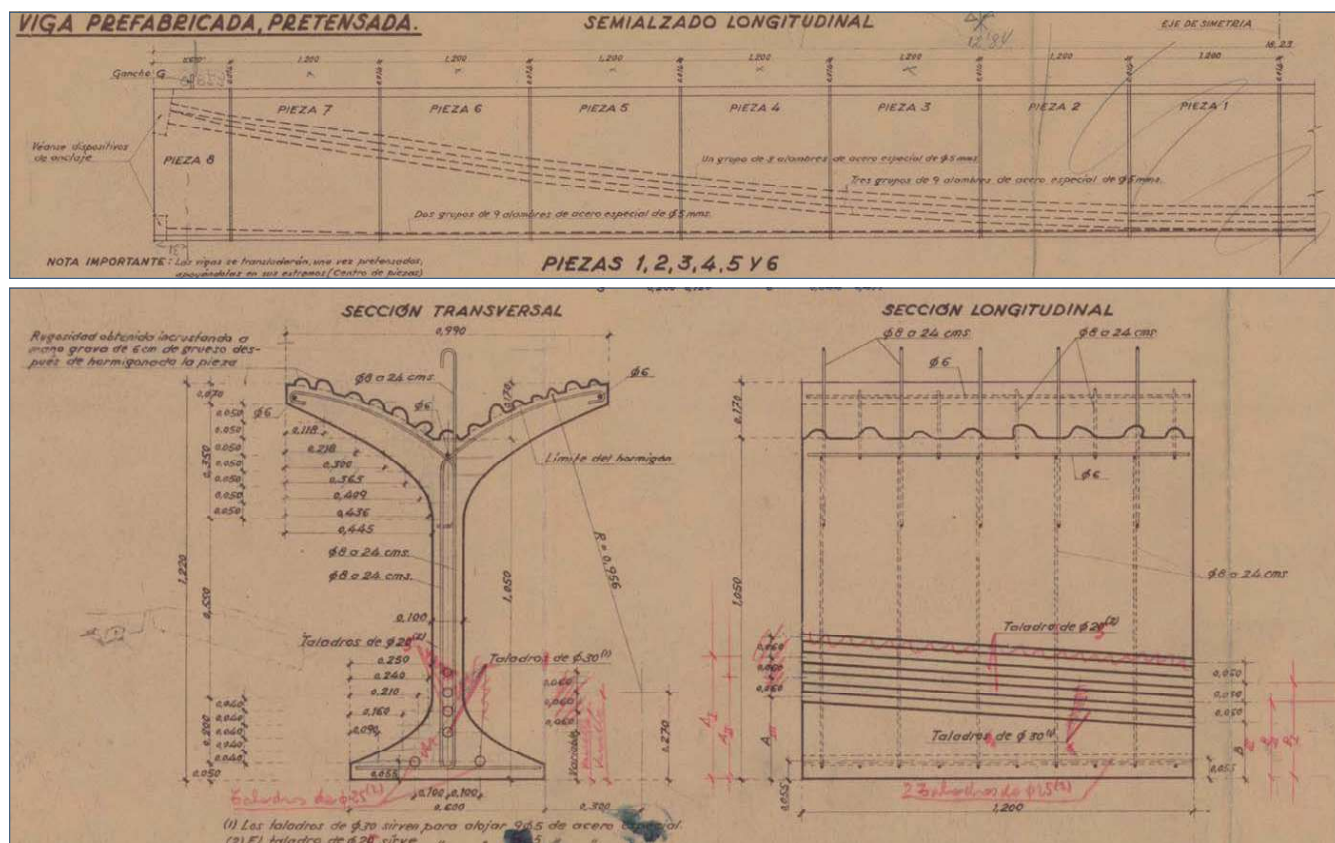


Figura 6. Configuración del pretensado longitudinal y detalle de la sección transversal de las vigas

La fig. 8 muestra una de las leyendas de los planos, la que hace referencia a las características de los materiales. Se utilizaba ya el concepto de resistencia característica, que se introdujo en la HA-57 del Instituto Técnico de la Cons-

trucción y del Cemento (precursora de las Instrucciones de hormigón estructural en España), a la que no eran ajenos, sino más bien protagonistas, los ingenieros Páez y Torroja. Cabe destacar también que los planos prescriben que, tras

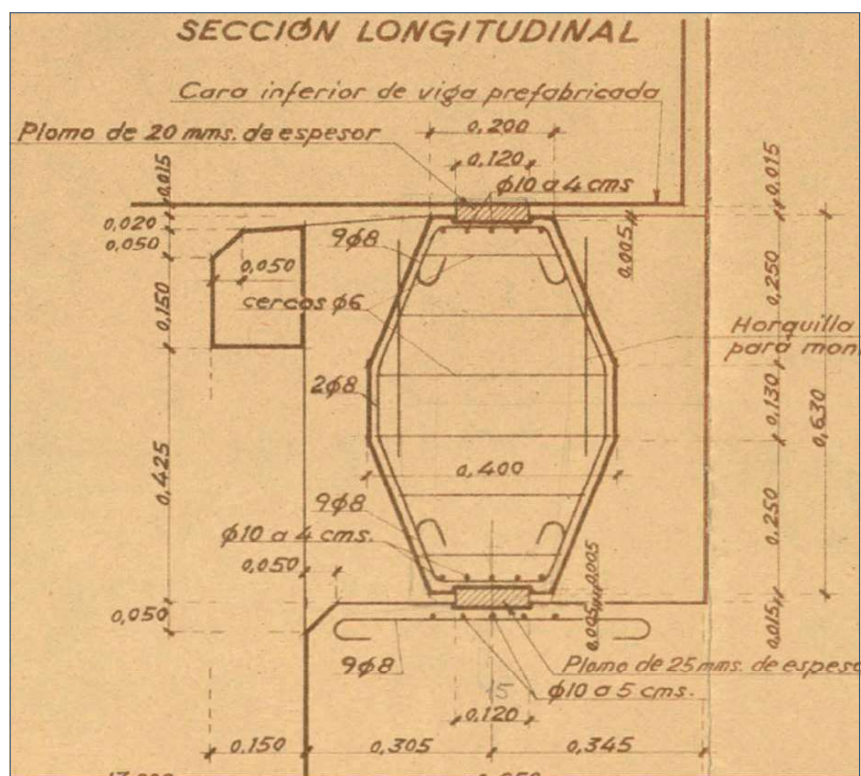


Figura 7. Configuración de los estribos



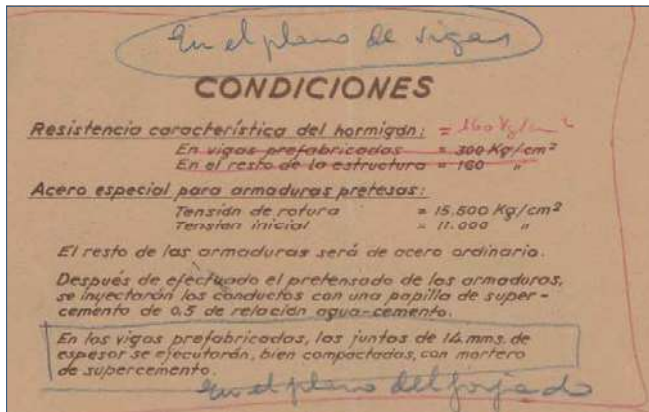


Figura 8. Notas de los planos originales relativas a los materiales y la inyección

el tesado, se inyectarán los conductos con una papilla de supercemento de 0,5 de relación agua-cemento. Sin embargo, no se ha encontrado en los planos definición alguna de los procedimientos de inyección, ni de sus dispositivos, particularmente en la armadura longitudinal, pues la transversal iba alojada en unas ranuras que, tras el tesado, se rellenaron con la aludida papilla mediante simple vertido.



Figura 9. Corte de la calzada en la tarde del 28 de mayo de 2015 tras detectar un conductor un extraño en la plataforma. (Cortesía de Javier de Juanas de ACEINSA.)



Figura 10. Vista de la viga 1 (lado izquierdo) en la tarde del 28 de mayo de 2015. (Cortesía de Javier de Juanas de ACEINSA.)

3. Colapso de la estructura

En la tarde del jueves 28 de mayo, el conductor de una furgoneta detectó una irregularidad en el pavimento a la altura del puente (fig. 9), dando cuenta de ello a la Guardia Civil. Cortada la carretera por orden de los técnicos de la Comunidad de Madrid y con los medios de la empresa ACEINSA de conservación integral del tramo, se pudo comprobar el poco convencional modo de fallo que se observa en la fig. 10.

En la fig. 11³ se muestra el aspecto de la plataforma en la mañana del 29 de mayo, con un cierto progreso en la flecha con relación a la observada la víspera, progreso que también se observa al comparar la fig. 12 con la 10. En la fig. 13 se presenta el estado de las vigas, con dovelas separadas pero no en una única sección transversal del tablero, sino en sitios diversos, situación que, lógicamente, desconcierta al inspector de estructuras que no está acostumbrado a ver escenas de este tipo.

La fig. 14 muestra una de las juntas, ocultas bajo el pavimento, a cuyos lados se hicieron unas marcas para



Figura 11. Vista de la plataforma a las 12:02 del 29 de mayo de 2015



Figura 12. Vista de la viga 1 (lado izquierdo) a las 11:55, aprox., del 29 de mayo de 2015. Se aprecian las juntas entre dovelas

³ Las fotografías de las figs. 11 en adelante fueron tomadas por los autores los días 29 de mayo y siguientes.

tener una idea de la evolución de los corrimientos, que fueron progresando hasta el colapso. Con el fin de comprobar si cabía algún margen para que el tablero se aco-

dalara contra los muretes de los estribos, se accedió a su lateral (figs. 15 y 16) y se pudo observar que los altares estaban limpios y que, tras los extremos de las vi-



Figura 13. Vista de la cara inferior del tablero desde lado izquierdo hacia E-2. Vigas rotas en secciones diferentes



Figura 16. Giro del tablero en lado derecho de E-2. Apoyo sobre péndulo



Figura 14. Junta oculta bajo pavimento pero abierta. Al final de la mañana del 29 de mayo, crecía la abertura a razón de 1 cm/h



Figura 17. Tablero colapsado hacia a las 14:45 del 29 de mayo de 2015. Vista desde E-1



Figura 15. Giro del tablero en lado derecho de E-1

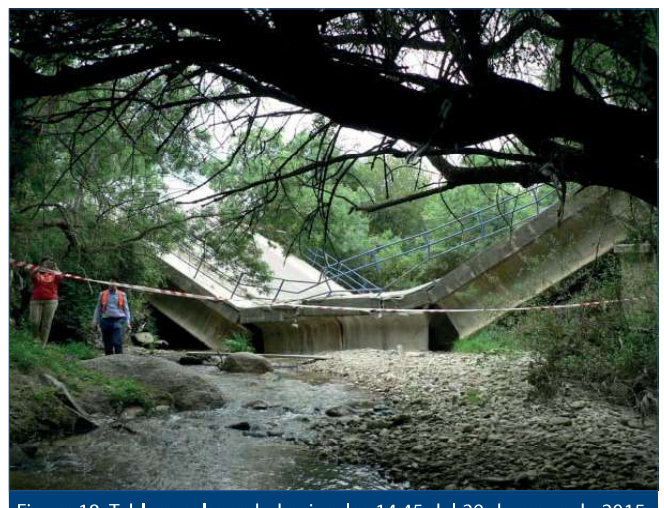


Figura 18. Tablero colapsado hacia a las 14:45 del 29 de mayo de 2015. Vista desde lado izquierdo

gas había espacio suficiente para el giro sin coacción. El colapso era inevitable y se produjo con gran ductilidad hacia las 14:45 de la tarde del viernes 29 de mayo de 2015 (figs. 17 y 18).



Figura 19. Alambres rotos hacia algún tiempo en sección de viga 1 (lado izquierdo), vista hacia E-1



Figura 20. Vista de alambre roto el día 29 de mayo. La pérdida de sección obligó a los no rotos por corrosión a movilizar toda su capacidad

4. Autopsia

La primera conclusión, deducida ya al ver la estructura en el estado que muestran las figs. 12 y 13, es que se trataba de una estructura de dovelas ensartadas por una armadura no adherente que, en ciertas secciones, no necesariamente coincidentes, había roto presuntamente por pérdida de sección tras un proceso de corrosión de los alambres. En las figs. 19 y 20 se observan claramente dos situaciones diferenciadas. En la fig. 19 se evidencia una rotura de la armadura, con una cierta estricción, pero ya oxidada, lo que expresa que el agotamiento no era reciente. En la fig. 20, sin embargo, la rotura de los alambres era reciente, de ese mismo día. Consiguientemente, la ductilidad de la estructura era la ductilidad de la armadura, que fue adquiriendo carga, a costa de deformación creciente, a medida que otros alambres fueron rompiendo progresivamente.

En los días siguientes al colapso, por encargo de la Comunidad de Madrid, se acometieron observaciones complementarias y se ordenaron ensayos que permitieran extraer las enseñanzas correspondientes. Dichos ensayos se desarrollaron en los laboratorios de Física de Materiales y



Figura 22. Torta de mortero interpuesta entre dovelas. Gran porosidad y depósitos calcáreos

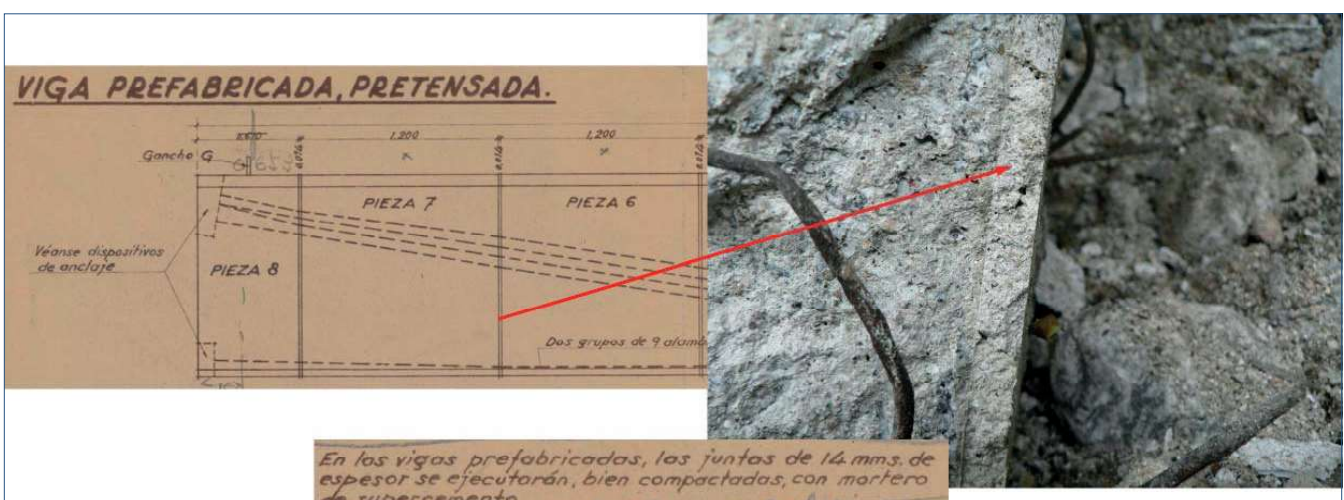


Figura 21. Torta de mortero interpuesta entre dovelas



Figura 23. Manguito de hojalata en la transición entre dovelas



Figura 24. Depósitos calcáreos en zona de juntas

de Química de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM, cuyos responsables redactaron unos magníficos informes [11] y [12] cuyas conclusiones se resumen en el último apartado de este artículo.

En la fig. 21 se muestra un *collage* que expresa cómo se ejecutó con precisión la interposición de un mortero de regularización, de 14 mm de ancho, en el contacto entre dovelas. En la fig. 22 se muestra la naturaleza del mortero, muy poroso y lixiviado. La cuestión está relacionada con el hecho de que, no estando inyectados los conductos, la corrosión de las armaduras provino preferentemente de la penetración de agua con sales por las juntas, ya que las cabezas de anclaje estaban hormigonadas.

En la fig. 23 se muestra el detalle de un manguito de hojalata que, dispuesto en las juntas, impedía, durante el vertido, que el mortero se colase por los conductos de pretensado, lo que impediría o dificultaría posteriormente el tesado. Con esta técnica de puesta en obra era muy difícil, desde luego, asegurar una calidad adecuada del mortero. El paso del agua, con los años, se fue encargando de lavar esas juntas, disolviendo el carbonato cálcico del mortero, que precipitaría posteriormente en la cara inferior (fig. 24). Debe observarse, no obstante, que la durabilidad no estaba tan comprometida por la carbonatación del mortero y su lixiviación, ya que no era el pH un factor de protección al no haber contacto íntimo entre hormigón y mortero.

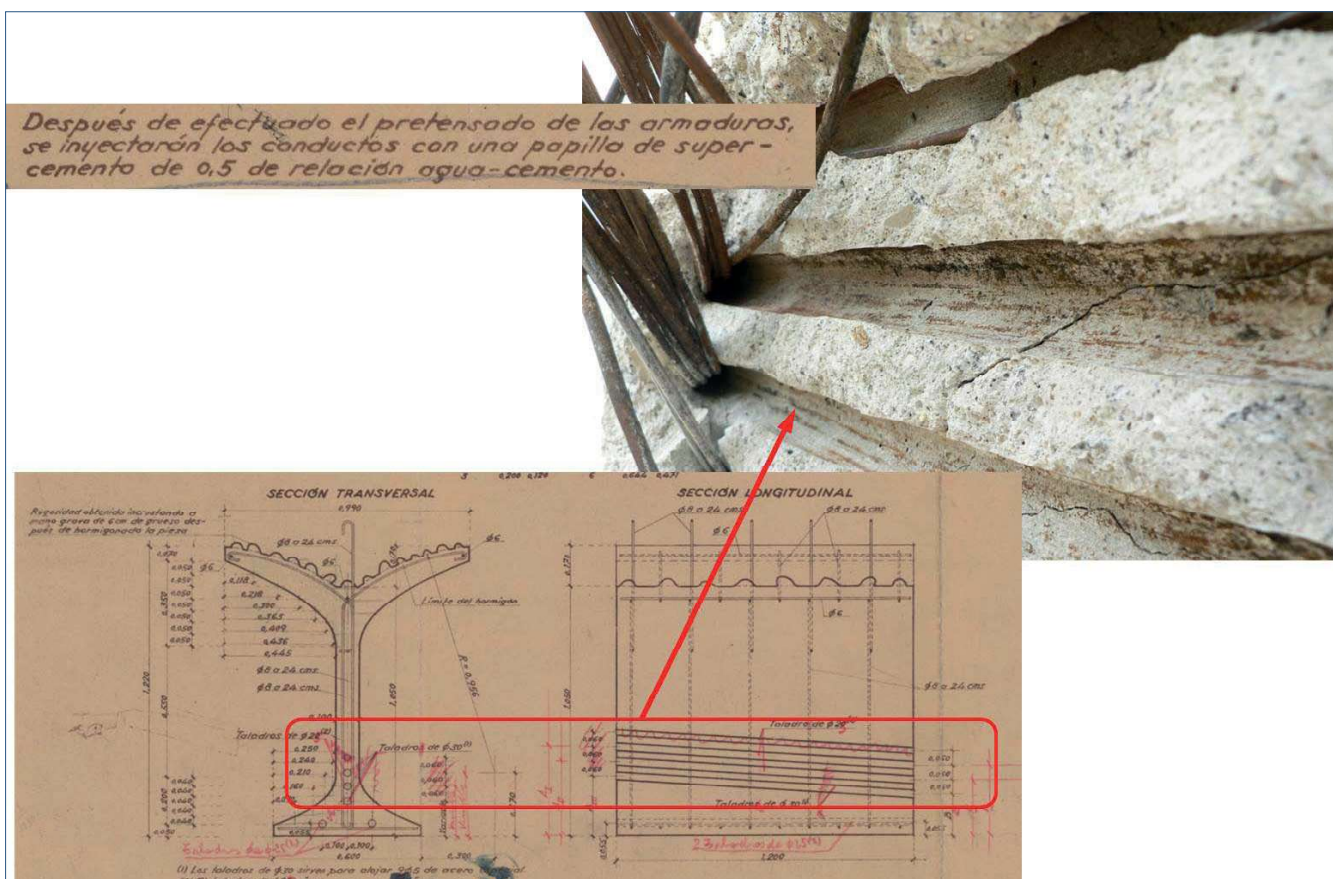


Figura 25. Armadura no inyectada, a pesar de las indicaciones vagas del proyecto, porque no especifica cómo hacerlo

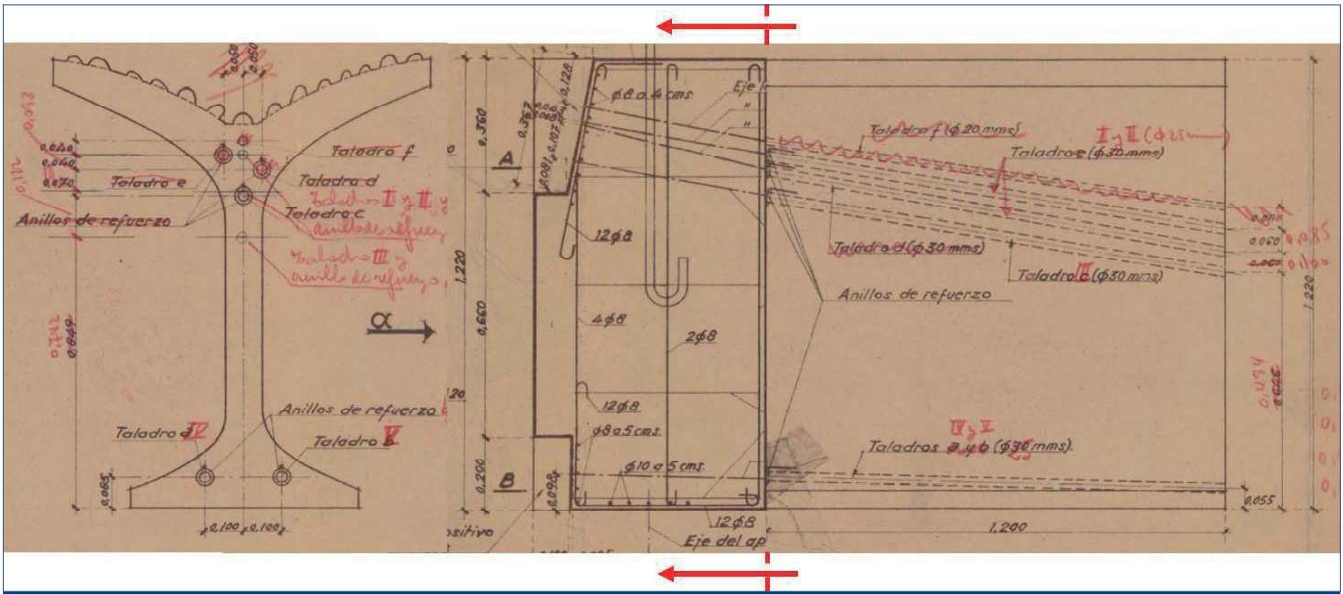


Figura 26. Encuentro de dovela de cabeza con pieza 7

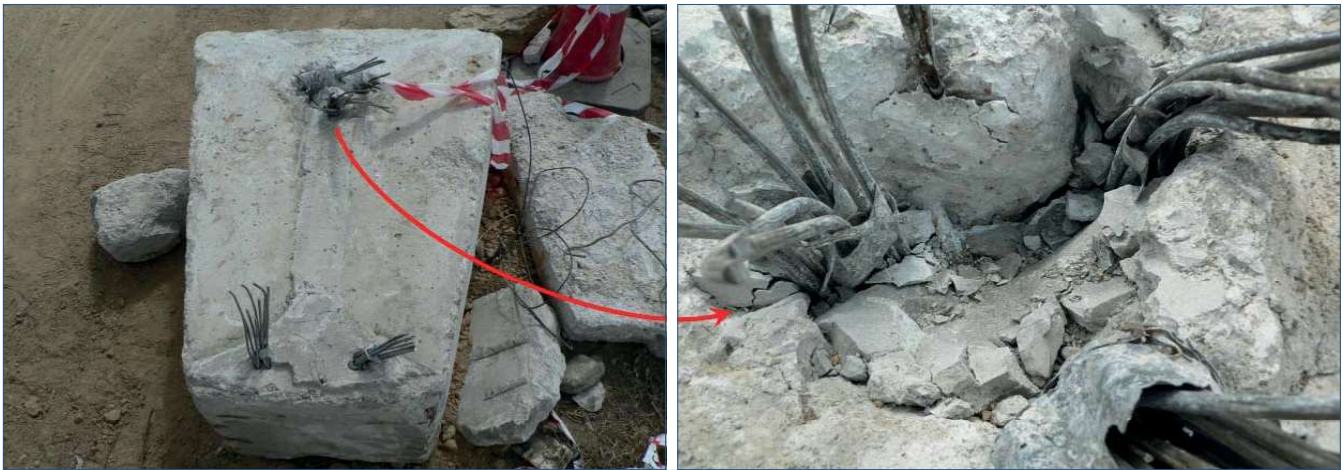


Figura 27. Aspecto de dovela de cabeza y detalle de la lechada que cubría los alambres en esa zona



Figura 28. Cabezas de anclaje del pretensado longitudinal parabólico y corrosión incipiente en alambres tras la placa



Figura 29. Cordones longitudinales rotos por corrosión en viga 1, lado izquierdo, cara inferior de viga (muestras entregadas el 10 de junio de 2015). Entorno de hormigón prefabricado aún no carbonatado

En la fig. 25 se puede comprobar esto mismo al observar los restos de conductos sin inyectar, mientras que en las figs. 26 y 27 se presenta la sección transversal de una de las vigas en su cabeza y el resultado de la autopsia durante la demolición, detectándose que las cabezas de las vigas sí estaban protegidas con la *papilla de supercemento*. Este resultado reforzaría la idea de que la corrosión preferente se produjo fuera de las zonas de anclaje del pretensado longitudinal.

En la fig. 28 se presentan las cabezas de anclaje del pretensado longitudinal, tal y como estaba concebido en proyecto (con el detalle de la cuña múltiple del sistema Barredo utilizado), junto con muestras tomadas durante la demolición. A la derecha se observa con más

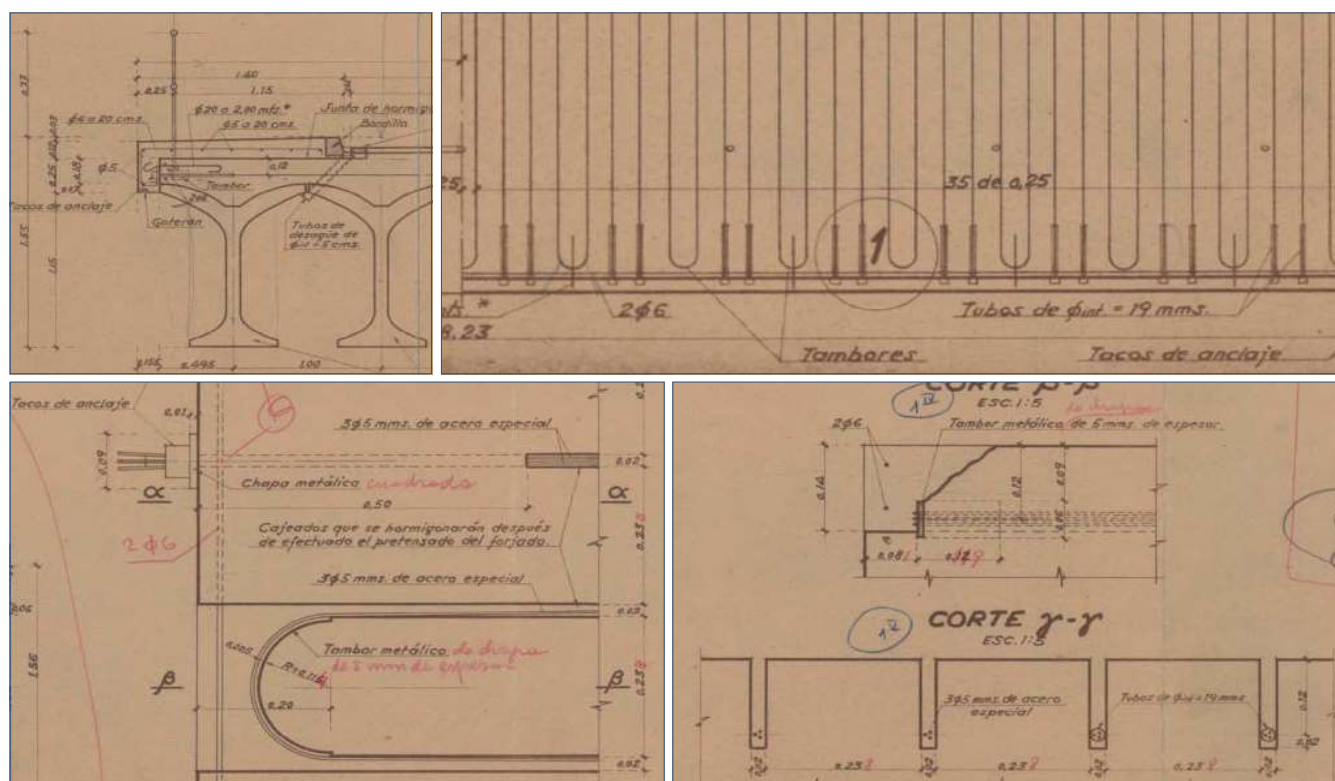


Figura 30. Disposición del pretensado transversal



Figura 31. Tambor de anclaje pasivo en lado izquierdo, con corrosión



Figura 32. Alambres de pretensado transversal corroídos en lado izquierdo, en losa sobre viga 2



Figura 33. Estribo de armadura pasiva con picaduras de corrosión (ubicación desconocida)

detalle que, a pesar de todo, se produjo corrosión en los alambres de pretensado de la armadura longitudinal tras las placas de anclaje, en la zona de más deficitaria protección.

En la fig. 29 se muestran las armaduras corroídas de una de las vigas, al mismo tiempo que se observa cómo el hormigón prefabricado, no así el mortero de la junta, estaba aún sin carbonatar, lo que da fe de la buena calidad de dicho hormigón desde el punto de vista de la durabilidad, aspecto más bien secundario en este caso.

En la fig. 30 se muestran detalles de los planos con la armadura transversal de pretensado, con las cabezas activa y pasiva de pretensado (ésta consistía en un arrollamiento semicilíndrico contra una pletina doblada. También se aprecia cómo los alambres se disponían en ranuras y se rellenaba después, como se ha dicho más arriba, para proteger la armadura. La fig. 31 permite ver cómo se había corroído la armadura en dicha cabeza pasiva.

La fig. 32 muestra el estado de corrosión severa de las armaduras de pretensado transversal. También se detectó corrosión, pero de menor trascendencia, en la armadura pasiva transversal, como se observa en la fig. 33.

En la fig. 34 se puede observar la existencia de los ya descritos conectadores de piedra, uno de los cuales está partido.

En la fig. 35 se observa un detalle de capital importancia: el sobre-espesor del paquete de firmes, de unos 22 cm, lo que equivale a un incremento de la carga muerta de más de 5 kN/m². Se trata de una situación, muy generalizada en España, que es el resultado de repavimentaciones que no pasan por el fresado completo previo de la capa anterior, lo que conduce progresivamente a un espesor casi nunca controlado de la carga muerta real y, por tanto, a un desconocimiento del margen disponible para las sobrecargas.

5. Conclusiones

Causas congénitas

- Falta de protección de la armadura de pretensado, tanto transversal como longitudinal, por desconocimiento de los mecanismos de corrosión, por error de proyecto (no se especifica procedimiento de inyección de las vainas) y falta de control de ejecución o de decisión durante las obras. En descargo del proyectista, ingeniero de gran solvencia, hay que decir que en la época en que se proyectó y construyó el puente, no eran suficientemente conocidos los mecanismos de durabilidad. Baste decir también, a título indicativo, que la extensión y contenido del capítulo dedicado a la protección de los tendones en el libro de Leonhardt pasa de 10 páginas (de un total de 460) en la edición de 1955 [7] a 27 (de un total de 754) en la traducción española [8], con un contenido totalmente renovado.
- Detalles constructivos eventualmente inadecuados, como el trazado poligonal del pretensado, que concentraría el rozamiento de los alambres en los vértices o juntas entre dovelas, pudiendo dar lugar al conocido fenómeno de *fretting* o corrosión propiciada por el rozamiento, el desplazamiento relativo entre acero y su entorno.
- Falta de robustez del conjunto. La disposición de armadura no adherente en un sistema de dovelas conectadas exclusivamente por el pretensado deja más expuesta a la estructura frente a situaciones de fallo localizado. Así, cualquier sección del tablero era crítica, dado que, al ser la parábola del trazado del pretensado antifunicular de las cargas uniformes, la tensión en los alambres era la misma en todos los puntos (si se desprecia el rozamiento). En este sentido hay que destacar

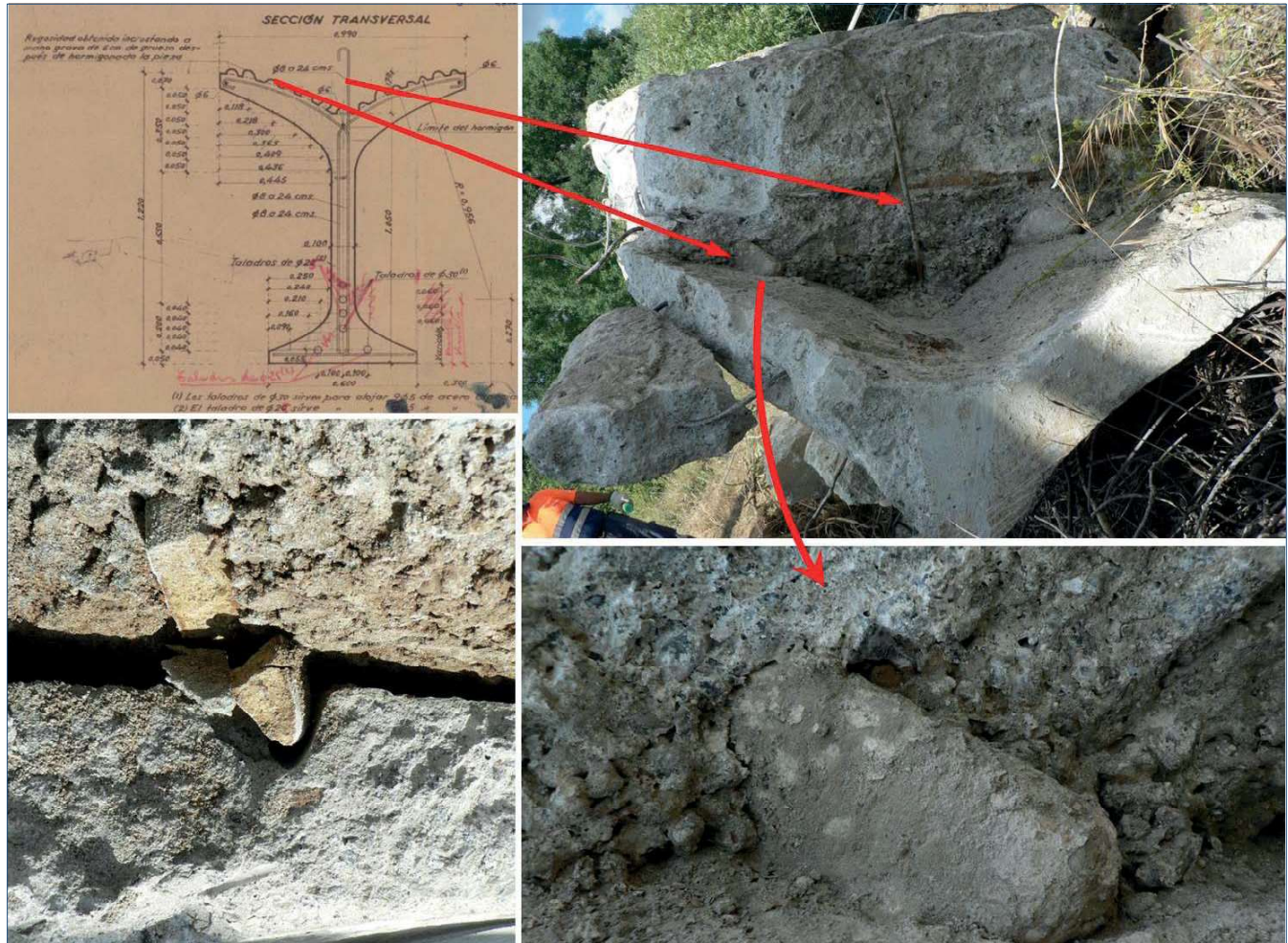


Figura 34. Conectores de piedra entre las dovelas prefabricadas y la losa superior. El texto del plano reza Rugosidad obtenida incrustando a mano grava de 6 cm de grueso después de hormigonada la pieza

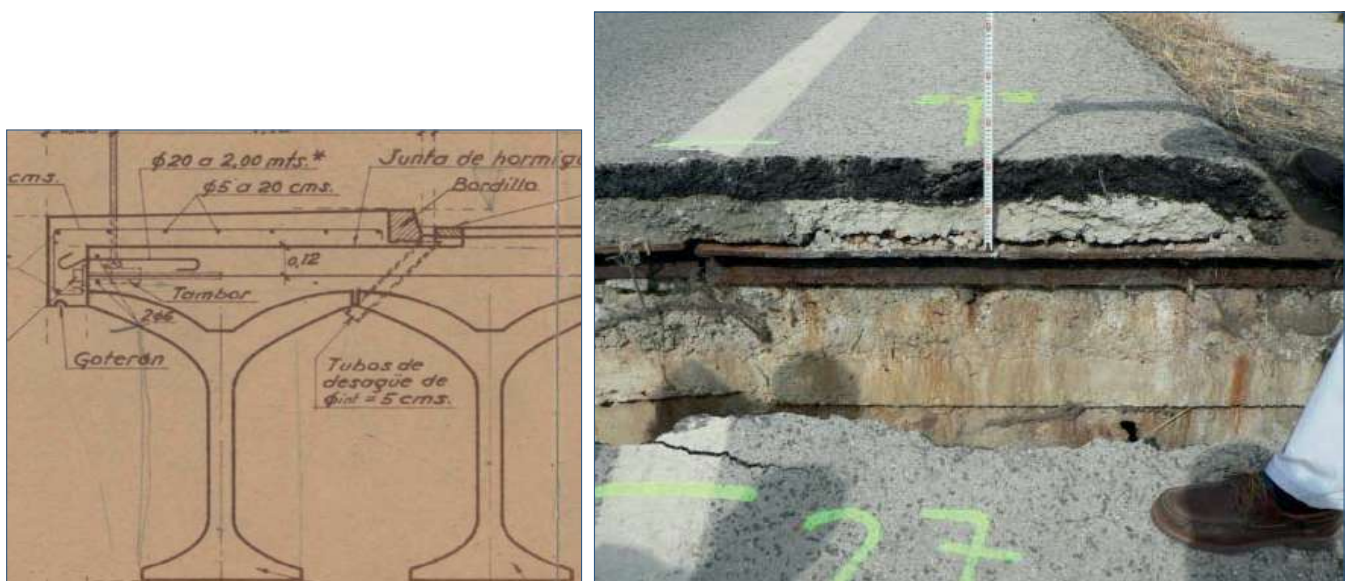


Figura 35. Recreido del pavimento, notorio sobre la junta en el estribo 1

que el valor de la robustez como cualidad estructural ha ido ganando enteros en los últimos años, frente a los planteamientos más minimalistas de épocas anteriores.

- Se descartan completamente otras causas más convencionales (flexión, cortante, fallo por rasante entre juntas, movimientos de cimentación, acciones térmicas o deformaciones impuestas, etc.).

Causas relacionadas con el mantenimiento

- Sobre-espesor excesivo del paquete de firmes. Como se ha indicado, esta cuestión, endémica en las estructuras españolas y de otros países, requiere de más atención en lo sucesivo porque, salvo en los puentes de bóvedas de fábrica, aporta más desventajas que beneficios, tanto a la cimentación como a la capacidad portante de la obra y su aptitud para aceptar sobrecargas.
- Vertido de sales fundentes. Este punto afecta por igual a estructuras antiguas y a nuevas, puesto que no se generalizó el empleo de sales fundentes hasta finales de la década de 1980, con consecuencias que no siempre resultan visibles, como en este caso, y en otras en que, aunque el pretensado sí sea adherente, la corrosión inducida por cloruros pueda no generar la expulsión del recubrimiento.
- Falta de criterio a la hora de inventariar una estructura singular. Sobre este punto cabe plantear un debate cuya extensión rebasa los límites de este artículo. Se trata de un problema que afecta realmente a toda la profesión y que tiene que ver con la educación de los ingenieros y su conocimiento de la historia de la ingeniería estructural, así como de su capacidad para identificar y valorar las aportaciones y novedades que se han ido introduciendo a lo largo del tiempo. Este déficit es especialmente notable entre los técnicos dedicados a la ingeniería de mantenimiento, especialmente necesitados de capacidad de discernimiento de no sólo si una estructura es armada o pretensada, si es isostática o hiperestática, un arco o una viga de canto variable, sino del momento en que fue construida, porque ese conocimiento aporta un valor añadido a la hora de identificar esquemas de armado, trenes de carga, características de los materiales, procedimientos constructivos, etc. La referencia [9] contiene algunas reflexiones al respecto. En otras palabras, la gestión de los puentes ha de incorporar los elementos que caracterizan su valor patrimonial, de obra de ingeniería, y los puntos críticos de la estructura, de su durabilidad y de la seguridad de los usuarios.
- Necesidad de mejorar los criterios de inspección. En este punto los autores deben reconocer que, para la mayor parte de los inspectores, éste era uno más de los innumerables puentes de vigas de hormigón que existen por el mundo. Esta experiencia enseña que se hace necesaria, además de un ojo más educado en la detección de la singularidad de la estructura, la educación para sospechar de que

una determinada estructura, como ésta, fuera poco robusta y especialmente vulnerable a la corrosión. En ese sentido, se insiste en la necesidad de contar con catálogos de daños que recojan la casuística de daños [10] y de identificar los riesgos asociados a ciertas formas de rotura.

Conclusiones y enseñanzas

- La causa de la rotura es el fallo de las armaduras activas longitudinales por corrosión (sin descartar el *fretting*). Las transversales están igualmente corroídas, especialmente en las zonas entre arcén y acera, pero no han sido críticas.
- El fallo ha sido tan dúctil como lo ha sido el acero no corroído, con la capacidad de aviso constatada (deformación del pavimento) y rotura lenta aunque progresiva.
- El material cementante presenta en algunas zonas elevados contenidos de cloruros, que justifican el proceso de corrosión sufrido por los materiales metálicos. La situación de las áreas que presentan las elevadas concentraciones mencionadas, se corresponde con la filtración del agresivo aportado por las sales de deshielo en zonas de escorrentía, por lo que existe una gran variación en el contenido total de cloruros en diferentes puntos del material.
- Tanto los ensayos realizados *in situ* como en el laboratorio para evaluar el nivel de carbonatación de la estructura mostraron que éste era despreciable, por lo que en ningún caso ésa puede ser la causa del proceso de corrosión.
- Los resultados de los ensayos de tracción y el examen de las superficies de fractura mediante microscopía descartan que el acero de las armaduras activas del puente colapsado haya experimentado procesos de fragilización o fisuración capaces de empeorar su comportamiento mecánico en cuanto a resistencia y ductilidad.
- Sin embargo, los alambres de las armaduras han sufrido un intenso proceso de deterioro, aparentemente por corrosión, que se ha repartido muy desigualmente en el conjunto de la estructura y ha alterado severamente la geometría de los alambres en la sección transversal de un alambre de armadura activa.
- El hecho de que el acero haya conservado su resistencia y ductilidad ha dado lugar a que el daño inducido por el deterioro se haya limitado a la pérdida progresiva de sección resistente de las armaduras activas más expuestas al medio corrosivo, si bien en un plazo de tiempo tan dilatado, la disminución de capacidad portante de las armaduras que

conllevar la pérdida de sección ha llegado a agotar el margen de seguridad con que se proyectaron. La desigual exposición de las armaduras al medio corrosivo habría propiciado roturas de alambres, individualmente no críticas para la integridad de la estructura, pero cuya acumulación ha agotado el margen de seguridad. El hallazgo en el puente colapsado de alambres con roturas muy anteriores al colapso confirman esta interpretación.

- Los factores determinantes del colapso han sido la limitada protección de las armaduras activas frente a los agentes corrosivos externos y la sensibilidad del acero a la corrosión, posiblemente consecuencia de un tratamiento de temple y revenido controlado en menor medida de lo que su trascendencia a largo plazo requería.
- A pesar de todo, la estructura ha tenido una vida útil de 57 años, mayor que la prevista, probablemente, por su autor (quizás 50 años), y equivalente a la que se prescribiría hoy para una estructura similar en luces y tipo de vía. En este sentido, hay que recordar que Alfredo Páez fue ingeniero pionero en el planteamiento del proyecto de estructuras en el contexto de los estados límite últimos, para lo que desarrolló un sistema de coeficientes parciales que tenían en cuenta la vida útil de las estructuras.
- Se ha perdido una estructura singular, de valor patrimonial no conocido de antemano. Se debe estimular la búsqueda de la información de las estructuras de este tipo, al menos de las representativas, e incorporarla a las bases de datos de inventario.
- Se recomienda estudiar sobre inventario las estructuras de hormigón pretensado proyectadas y construidas entre 1950 y 1970, aproximadamente, dado que:
 - a) ha transcurrido un tiempo equiparable a la vida útil prevista y en el que se han podido desarrollar mecanismos de corrosión, no siempre visibles desde el exterior;
 - b) en esos años no estaba desarrollada suficientemente la tecnología para asegurar una inyección eficaz de las vainas de pretensado; y
 - c) posiblemente, hayan visto incrementado el espesor del paquete de firmes y, consiguientemente, disminuido el valor nominal del margen frente al paso de sobrecargas.
- Sobre las estructuras seleccionadas de entre las identificadas en el apartado anterior, realizar auscultaciones orientadas a conocer el estado de la inyección y del paquete de firmes.
- Se recomienda revisar los protocolos de actuación en inspecciones y mantenimientos ordinario y especializado.

Si, como los autores esperan, se aprovecha la oportunidad para aprender, la pérdida de esta notable estructura no habrá sido estéril y este puente de Alfredo Páez habrá entrado por la puerta grande en ese estado posterior al de la etapa de servicio, que es el de la Memoria engrandecida por el aprendizaje.

Bibliografía

1. Bauder, E. Las edades del puente de fábrica. Terminología y metáfora. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
2. León, J. Algunas consideraciones sobre la intervención en puentes bóveda de piedra o ladrillo. *Revista de Obras Públicas*, 2015, 162 (3562): 51-62.
3. Vitruvio Polión, M. Los Diez Libros de Arquitectura. Traducción del latín y comentarios de Don Joseph Ortiz y Sanz. Madrid, 1787. Re-edición de Akal. Madrid, 1992.
4. Bernabéu J.; Berrocal, A.; Hernández P., López A., Hernández, V. La consideración patrimonial de las obras públicas. Fundación Miguel Aguiló. <http://www.fundacionmiguelaguilo.org/2011/06/la-consideracion-patrimonial-de-las-obras-publicas/>, 2011.
5. ATEP. Realizaciones españolas en hormigón pretensado. Asociación Técnica Española del Pretensado (hoy ACHE), 1970, pp. 15 y 16.
6. CEHOPU. <http://www.cephopu.cedex.es/etm/expt/ETM-406-001.htm>. Página web que contiene la información de referencia.
7. Leonhardt, F. Spannbeton für die Praxis. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn. Berlin, 1955.
8. Leonhardt, F. Hormigón pretensado. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Trad. Alberto Corral. Madrid, 1977.
9. León, J.; Corres, H.; Prieto, F. Inspección y evaluación de estructuras existentes: una tarea para ingenieros valientes. *Revista de Obras Públicas*, nº 3.492. 2008.
10. ADIF. Inspección y diagnóstico de puentes ferroviarios de hormigón. Madrid, 2008.
11. Valiente, A.; Iordanchescu, M. Puente sobre el río Guadarrama en la carretera M527: Integridad estructural de las armaduras activas tras 58 años de servicio. Departamento de Ciencia de Materiales. ETSICCP-UPM. Trabajo no publicado, 2015.
12. Moragues, A. Ensayo de contenido de cloruros, ATD y porosidad de los testigos del puente colapsado sobre el Guadarrama, en el PK 1+600 de la M-527. Laboratorio de Química de Materiales. ETSICCP-UPM. Trabajo no publicado, 2015.