

Nuevos viaductos del Castro

Consideraciones sobre el proyecto de viaductos en zonas de montaña sometidos a operaciones de vialidad invernal



Alvaro Serrano Corral

Director Técnico

MC2 Estudio de Ingeniería
Grupo TYPESA

Miguel Bañares Dorado

Director Técnico de Estructuras
ESTEYCO

Pablo Domínguez Gómez

Director de las Obras
Demarcación de Carreteras del
Estado en Galicia. DGC, MITMS

1. Introducción

Los viaductos del Castro están situados en la Autovía del Noroeste, A-6, en la provincia de León, prácticamente en el límite con la provincia de Lugo a través del puerto de Piedrafita del Cebreiro, siendo la última estructura de la vertiente leonesa del puerto antes de superarlo a través del túnel de Piedrafita.

Su construcción se inició dentro del tramo Castro/Lamas – Noceda a finales del siglo pasado, poniéndose en servicio el tramo que contiene el viaducto en julio de 2001.¹

Los viaductos originales consistían de sendos tableros para calzadas independientes, con la misma tipología, denominados viaducto 'grande' para la calzada derecha sentido A Coruña y los viaductos

'pequeño' y 'mediano' para la calzada izquierda sentido Madrid, separados por un tramo en terraplén entre muros de suelo reforzado.

El tablero sentido A Coruña presentaba de una longitud de 583,40 metros, con 13 vanos de 45 metros entre ejes de pilas. Este tablero presentaba de tres carriles de circulación. La calzada sentido Madrid se componía de dos estructuras, una de 313,40 metros de longitud y 7 vanos de 45 metros entre ejes de pilas, y una segunda de 88,40 metros de longitud y dos vanos.

Los viaductos fueron construidos mediante la tecnología de dovelas prefabricadas (sin armadura pasiva).



Figura 1. Localización de los viaductos del Castro en la autovía A-6

¹ Piedrafita: puentes de comunicación. Autovía del Noroeste A-6. Tramo: Villafraanca del Bierzo-Cereixal. González del Río, Ángel; Martínez Cela, Ángel D. Revista de Obras Públicas. Año 2003. Número 3433. Págs. 20-51.

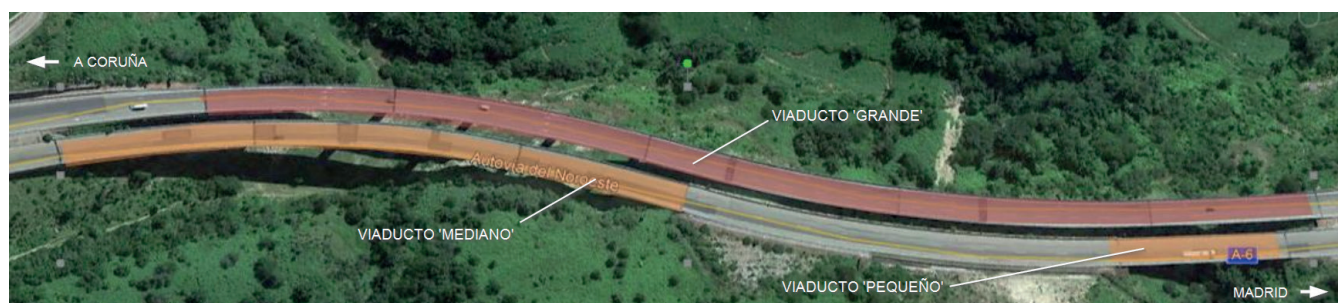


Figura 2. Planta de los viaductos del Castro en la autovía A-6.



Figura 3. Viaductos del Castro, previamente a las obras de rehabilitación. Calzada derecha sentido A Coruña

va pasante) y con una sección tipo cajón de 3,00 m de canto y 13,50 m de anchura, unidas entre sí mediante unos sistemas de pretensados exteriores a la sección de hormigón, que transcurrían por el interior del cajón.

La configuración estructural era de vanos completamente isostáticos. Entre vanos adyacentes se disponía un detalle muy estricto de loseta de continuidad, materializada con un cajeado y un hormigonado en segunda fase, que pretendía cubrir la junta entre los mismos.

En el año 2021, en el marco de las tareas habituales de inspección

y mantenimiento de los viaductos, se detectan daños llamativos en su sistema de pretensado exterior, realizándose una inspección especial centrada en la investigación sobre el estado de conservación de los mismos, que evidencia daños graves y extendidos en la práctica totalidad de los vanos de los tableros, dando lugar a la puesta en marcha de obras de emergencia para el refuerzo y sustitución del sistema de pretensado, así como la reparación de diversos deterioros de tipo durable que, igualmente, existían en los viaductos.

En la fase final de realización de estas obras en la calzada del viaduc-

to sentido A Coruña, con el viaducto cerrado al tráfico, el 7 de junio de 2022 se produjo el colapso completo del denominado vano 3 del viaducto grande. A raíz de este incidente y como medida preventiva se desvía también el tráfico del sentido Madrid a la N-VI a través de la localidad de Piedrafita del Cebreiro. De la misma manera, apenas unos días después, el 16 de junio de 2022 colapsó el vano 1 del mismo viaducto, quedando en pie el vano intermedio entre ambos.

A raíz de este incidente, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, además de iniciar las investigaciones conducentes a la investigación forense de los colapsos, tomó la decisión de sustituir los viaductos, mejorando su robustez, resiliencia y sus características frente a las condiciones climáticas de montaña y vialidad invernal. El presente artículo pretende exponer las lecciones aprendidas a raíz de la experiencia, así como establecer una serie de criterios que deberían ser contemplados en el diseño y construcción de estructuras emplazadas en zonas de montaña y alta montaña.



Figura 4. Estado final del viaducto de la calzada sentido A Coruña tras los colapsos del 7 y 16 de julio de 2022.

2. Problemática en viaduc-
tos de montaña sometidos
a operaciones de vialidad
invernal

Las carreteras o autovías que atraviesan zonas de montaña o alta montaña están sometidas a circunstancias muy particulares que afectan no sólo a la explotación de la vía, sino también a la conservación y mantenimiento de las estructuras de paso que les dan soporte:

- Generalmente, las zonas de montaña y alta montaña presentan una elevada pluviosidad que, en épocas invernales, se produce en forma de nieve. Esta elevada pluviosidad requiere, por un lado, un desagüe de la plataforma adecuado y bien mantenido; de forma que la circulación de vehículos se pueda realizar de forma segura. Además, la plataforma debe estar bien drenada y conservada, protegida de la entrada del agua desde el exterior.

Cuando la precipitación se produce en forma de nieve, la sección transversal de la vía debe estar preparada para la acumulación de nieve con arcenes y bermas adecuados; y en el caso de las estructuras, con barreras

o sistemas de contención de tipo permeable.

- En estas zonas, particularmente en el centro y norte de España, se producen temperaturas bajas durante un buen periodo del año, normalmente entre octubre/noviembre y marzo/abril. Para evitar que se hiele la superficie de la calzada, las operaciones de vialidad invernal se basan en el uso sistemático e intensivo de fundentes, generalmente sales de deshielo.

Por motivos económicos y de disponibilidad, la sal de deshielo utilizada es cloruro sódico, bien empleado directamente o bien en salmuera.

Adicionalmente, las estructuras, en aquellos elementos no tratados con fundentes, sufren frecuentemente ciclos de hielo y deshielo.

- Finalmente, el uso de máquinas quitanieves deteriora el pavimento de la vía.

También con bastante generalidad, las obras de paso construidas en las vías de montaña o alta montaña fueron proyectadas y construidas con normativas anteriores, en las que los requerimientos de durabilidad eran más laxos y generalmente prescribían recubrimientos de armaduras

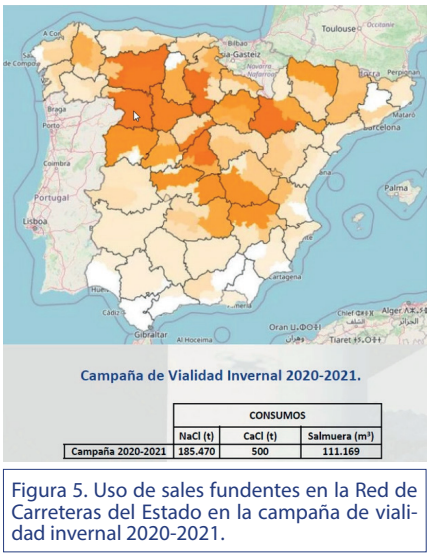


Figura 5. Uso de sales fundentes en la Red de Carreteras del Estado en la campaña de vialidad invernal 2020-2021.

en estructuras de hormigón armado inferiores a los exigidos actualmente. En muchos casos, estas obras de paso carecen de impermeabilización y de vías de desagüe de la calzada bien definidas; y muy habitualmente, carecen igualmente, de un acceso adecuado para inspección y mantenimiento.

Cuando se juntan las características particulares climatológicas y de explotación de la carretera con la realidad de las estructuras construidas, es muy frecuente e inevitable que éstas se vean muy afectadas en su durabilidad por la agresividad de los fundentes y de los ciclos de hielo y deshielo del agua no evacuada, dando lugar a daños que pueden llegar a ser muy severos e importantes.



Figura 6. Daños de durabilidad en estructuras debidos al uso de sales fundentes.

2.1. El caso particular de los viaductos del Castro

El tablero de los viaductos del Castro originales presentaba una sección transversal de 13,5 m, con un canto estructural del tablero es 3,00 m. La sección es de tipo cajón monocelular con un ancho inferior de 4,00 m y superior de 7,35 m, con sendas alas en voladizo de 3,075 m, con un canto variable entre 0,40 y 0,20 m en el extremo.

El tablero de los viaductos estaba formado por vanos isostáticos de 45,00 m de luz nominal entre ejes, con la excepción de los vanos extremos de los viaductos (adyacentes a los estribos), que presentan una luz entre ejes de 44,20 m. Estos vanos estaban constituidos por 16 dovelas prefabricadas de hormigón, unidas 'a hueso', sin continuidad en su armadura y cosidas por medio de un pretensado exterior, fuera de la sección resistente de hormigón, pero por el interior del cajón formado por ella.

Este pretensado estaba formado originalmente por 8 cables, 6 de ellos, los superiores, de 31 cordones de 0,60" (15,2 mm); y los dos inferiores de 24 unidades de 0,60", tesados respectivamente a 6172 kN y 4779 kN iniciales, correspondientes al 75 % de su carga de rotura. Los cordones de pretensado eran de tipo convencional, protegidos por una vaina plástica inyectada con lechada de cemento y los elementos de anclaje se situaban en la cara exterior del mamparo, y la mayor parte de ellos en una zona muy cercana a la cara superior del tablero.

Los tableros tenían juntas de dilatación en los estribos, cada dos vanos en los tramos adyacentes a los estribos y cada tres vanos en el resto de su longitud. En la plataforma, estas zonas de separación entre tableros se superan mediante juntas de elastómero armado.

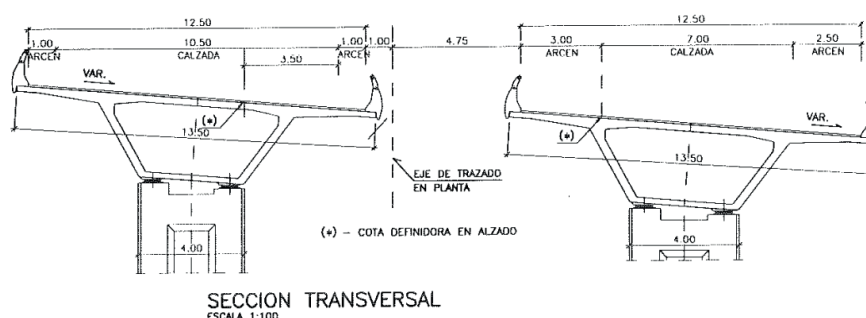


Figura 7. Sección tipo de las dos calzadas de la estructura

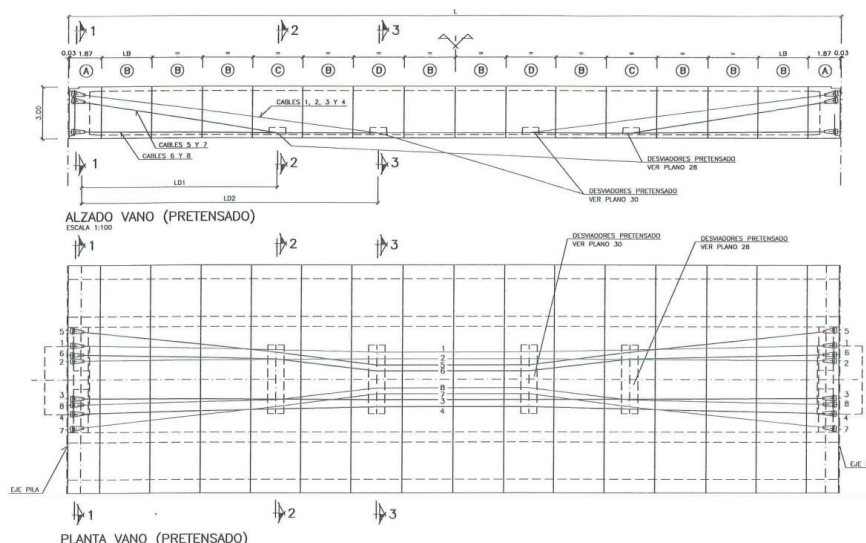


Figura 8. Alzado y planta del vano tipo con sus dovelas constitutivas y pretensado exterior

Cuando no hay junta de dilatación entre vanos, éstos estaban conectados mediante una loseta de continuidad a nivel de la plataforma de 11,5 cm m de espesor, que pretendía puentear las losas superiores de los dos vanos adyacentes.

Finalmente, el proyecto original contemplaba una impermeabilización y 8 cm de pavimento.

La tipología estructural del tablero presentaba múltiples inconvenientes desde el punto de vista de la durabilidad en un entorno de montaña sometido a operaciones de vialidad invernal. Así:

- La existencia de multiplicidad de juntas en el tablero, a sección completa, correspondientes a las uniones entre cada una de las dovelas supone un punto débil recurrente de entrada de agua y agentes agresivos, hacia el inte-

rior de la sección que, además, en este caso afecta al pretensado exterior.

- Las numerosas juntas entre elementos estructurales coincidían exactamente con la ubicación de las cabezas de anclaje de los cables de pretensado. El agua con sales fundentes tenía una zona de entrada directa a estos elementos, adicionalmente en un espacio muy confinado. Esta exposición era aún más severa en el caso de los cables superiores.
- El pretensado exterior era apenas inspeccionable, pues no existían recorridos explícitos de acceso al cajón para inspección y mantenimiento adecuados y además no se había previsto su sustitución. El espacio existente entre los mamparos de los vanos adyacentes era muy reducido, dificultando enormemente cualquier

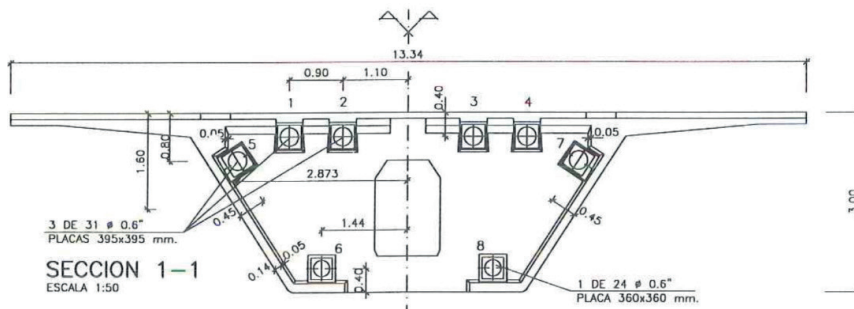


Figura 9. Sección tipo de anclajes en mamparo de pilas

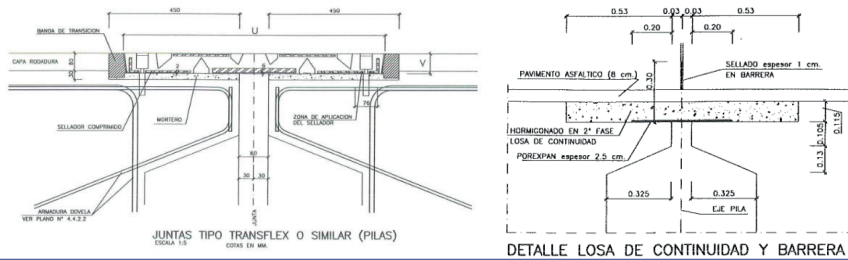


Figura 10. Junta de dilatación (izq.) y junta de continuidad (der.) en el tablero de los viaductos

tipo de inspección o trabajo en esas zonas. Adicionalmente, la tecnología de protección durable del pretensado se podía considerar ya obsoleta.

- tipo de inspección o trabajo en esas zonas. Adicionalmente, la tecnología de protección durable del pretensado se podía considerar ya obsoleta.
 - Los anclajes de los cuatro cables superiores estaban ubicados muy próximos a la losa superior. Además de la sobreexposición a las filtraciones de agua con sales fundentes, las distancias y resguardos a los paramentos eran muy ajustados.
 - Las dimensiones de los elementos estructurales, como los voladizos del tablero, espesores cajón o los mamparos extremos tenían unas geometrías muy estrictas, derivadas de la necesidad de ajustar los pesos al máximo para adecuarse a las capacidades de los medios auxiliares para la construcción.
 - Al tratarse las dovelas de elementos prefabricados, los recubrimientos de las armaduras eran muy limitados para el emplazamiento y condiciones particulares de la obra, siendo susceptibles de despasivarse y comenzar su corrosión en un plazo más corto.
 - El sistema de impermeabilización aplicado prácticamente había desaparecido, siendo inútil para su cometido de protección del tablero de hormigón.
 - La existencia de múltiples juntas en la calzada, cada vano, daba lugar a puntos de entrada de agua y agentes agresivos para la estructura que afectaban a todas las zonas de los mamparos. Este aspecto se retroalimentaba con los daños generados en zonas fisuradas por el comportamiento estructural de los mamparos, acelerando la corrosión en las armaduras de esas zonas, el hinchamiento de las mismas y el desprendimiento del recubrimiento.
- Finalmente, y en relación con el comportamiento estructural del tablero, esta tipología estructural carece de la más mínima robustez, si el pretensado exterior falla (bien por los sistemas de cables o por los elementos del tablero que los soportan) la estructura no tiene alternativa de respuesta resistente, no avisa, las dovelas se abren en las juntas frías y el tablero colapsa de forma frágil.

Finalmente, y en relación con el comportamiento estructural del tablero, esta tipología estructural carece de la más mínima robustez, si el pretensado exterior falla (bien por los sistemas de cables o por los elementos del tablero que los soportan) la estructura no tiene alternativa de respuesta resistente, no avisa, las dovelas se abren en las juntas frías y el tablero colapsa de forma frágil.

A pesar de todo lo expresado anteriormente, es necesario decir que el proyecto de los viaductos construidos cumplía con todos los estándares de construcción de aquella época en la que, sin embargo, aún no se tenían en cuenta, como se tiene en la actualidad, las necesarias condiciones de robustez, durabilidad y necesidad de inspección y mantenimiento. La tecnología empleada en su construcción fue considerada innovadora, y permitía ritmos de construcción muy competitivos frente a otros sistemas existentes.

3. Reconstrucción de los viaductos

Para la reconstrucción de los viaductos, surge la oportunidad de proyectar y construir una solución estructural que corrija todos los aspectos perjudiciales observados en los viaductos originales y que sirva como ejemplo para la ejecución de estructuras en vías de montaña o alta montaña sometido a la singularidad climática de estas zonas y a operaciones intensas de vialidad invernal.

Los principios que rigieron el proyecto y la ejecución del proyecto de las nuevas estructuras fueron los siguientes:

- Opción por el empleo de un tablero de tipo hiperestático continuo para mejorar la robustez de la estructura de forma que, en caso de fallo de una cierta sección del mismo, se produzca una redistribución dúctil hacia otras secciones, sin provocar el colapso del tablero (“La ductilidad es un puente sobre nuestra ignorancia”).
- Minimizando de las juntas de construcción a una por vano exclusivamente, con el objeto de reducir al mínimo posible el punto débil al que dan lugar.

- Minimización de juntas de dilatación, disponiéndolas exclusivamente en los estribos, para evitar escorrentías de agua con cloruros en zonas intermedias de las estructuras.
- Sistema de pretensado interior tratado con un especial cuidado en lo relacionado con la inyección de las vainas y la disposición de los anclajes alejados de las potenciales zonas de entrada de agua.
- Previsión de colocación de eventuales tendones adicionales de pretensado externo en el tablero, por si algún día llegasen a ser requeridos.
- Planteamiento riguroso de las condiciones de durabilidad de los hormigones, en particular los requerimientos debidos al uso de sales fundentes.
- Aplicación de Eurocódigos, como norma más actual y desarrollada en el ámbito europeo.
- Sistema de impermeabilización y desagüe de la plataforma detallado y cuidadosamente ejecutado. Detallaje particular de sistemas de drenaje y canalización de la escorrentía de los tableros.
- Definición de caminos de inspección que alcancen a todos los puntos del interior del tablero y cabeza de pilas. Disposición de galerías de inspección en los estribos, con unas dimensiones y accesibilidad que faciliten las labores de inspección, de tal modo que no supongan una barrera para las imprescindibles tareas de conservación y mantenimiento.
- Monitorización del comportamiento de la estructura, tanto a nivel mecánico como de durabilidad.

A partir de los principios anteriores, se llevó a cabo el proyecto y la construcción de los nuevos viaductos según se indica a continuación.

3.1. Descripción de la solución estructural para la reconstrucción

El encaje de los nuevos viaductos mantiene el mismo trazado y la geometría en planta que disponía la autovía A-6 en esta zona, permitiendo la continuidad de las plataformas en los límites de la zona de actuación. La distribución más lógica de vanos surgía de intercalar las nuevas pilas y cimentaciones entre las existentes correspondientes a los viaductos originales, de forma que se evitaban interferencia entre ellas y la necesidad de la demolición parcial o total de las cimentaciones. Aun así, se aprovechó la oportunidad para mejorar algunos aspectos de las distribuciones de vanos, que explicamos a continuación.

En el viaducto pequeño de la calzada sentido Madrid se pasó a una configuración de tres vanos de luces 30,3 + 41,0 + 30,3 m, dejando un vano central para el paso libre del cauce existente (Arroyo de Val Fon-

tán), y eliminando la pila que el viaducto original tenía muy próximo al centro del cauce.

Adicionalmente, el esquema de tres vanos y un ligero incremento en la longitud del viaducto permitió separar los nuevos estribos de los paramentos de los muros de suelo reforzado existentes, que presentaban deterioros en los paramentos más próximos a las cimentaciones directas de los estribos del viaducto original. Además de alejar las cimentaciones de los nuevos estribos de los paramentos de los muros, las mismas se diseñaron profundas mediante micropilotes, de tal modo que se han minimizado las solicitaciones sobre los muros originales de suelo reforzado, relajando sus responsabilidades resistentes.

Una estrategia similar se siguió en el viaducto “mediano” del sentido Madrid: nuevas cimentaciones intercaladas entre las originales, e incremento de longitud del viaducto para alejar los nuevos estribos (con cimentaciones profundas) de los paramentos de los muros de suelo reforzado existentes.

La configuración de este viaducto es un tablero continuo con una

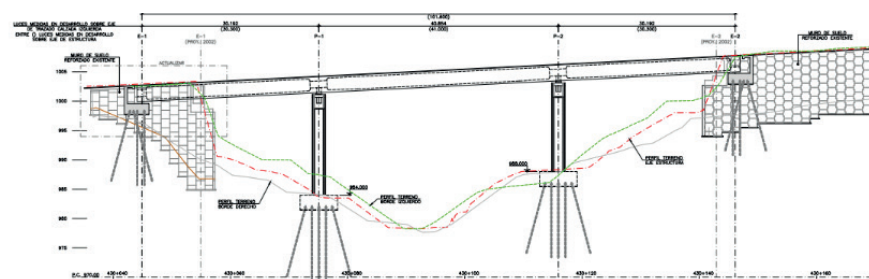


Figura 11. Alzado esquemático del viaducto 'pequeño' de la calzada sentido Madrid.

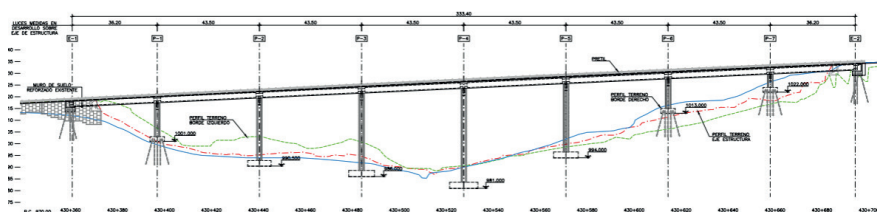


Figura 12. Alzado esquemático del viaducto 'mediano' de la calzada sentido Madrid.

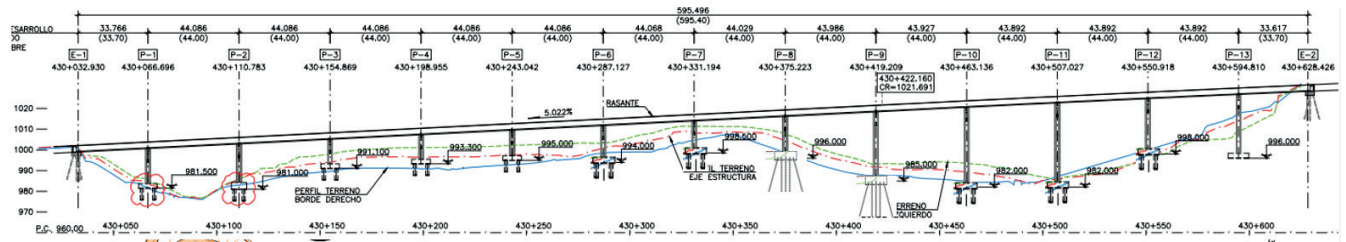


Figura 13. Alzado esquemático del viaducto 'grande' de la calzada sentido A Coruña.

distribución de ocho vanos de luces: $36,2 + 6 \times 43,5 + 36,2$ m. Las cimentaciones de las pilas son directas o profundas mediante micropilotes, dependiendo de la configuración geotécnica de su emplazamiento y de los condicionantes constructivos derivados de las afecciones de las excavaciones de las cimentaciones a los elementos diferentes elementos adyacentes.

En la calzada sentido A Coruña el nuevo viaducto es único (sin un tramo de terraplén intermedio) y la tipología y la filosofía de la reconstrucción es idéntica a la de los viaductos de la calzada sentido Madrid. En este caso el viaducto presenta catorce vanos, con la distribución de luces: $33,7 + 12 \times 44 + 33,7$ m.

Las cimentaciones de los estribos son pilotadas, mientras que en las pilas se combinan cimentaciones pilotadas y micropilotadas, dependiendo de los condicionantes geotécnicos y constructivos de cada línea de apoyos.

La sección transversal tipo de todos los viaductos es similar entre ellos y consiste en un tablero tipo cajón continuo de hormigón pretensado de canto constante de 2.70 metros. El ancho total de la losa superior es de 13.85 metros, mientras que el ancho del fondo del cajón alcanza los 6.0 metros. El espesor de ambas losas es de 0.30 metros; las almas, por su parte, mantienen un ancho constante de 0.48 metros. Para el hormigonado de la losa superior entre almas se emplearán prelosas de hormigón prefabricado como encofrado perdido, excepto en el viaducto pequeño

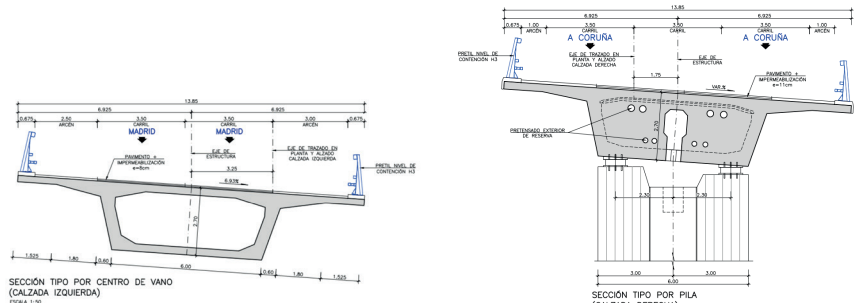


Figura 14. Sección transversal tipo de los viaductos. Izquierda: Sección de centro de vano en los viaductos sentido Madrid con dos carriles por sentido. Derecha: sección en zona de pila en el viaducto sentido A Coruña con tres carriles por sentido.



Figura 15. Indicación de elementos construidos para la estabilización de ladera en el entorno del muro de suelo reforzado.

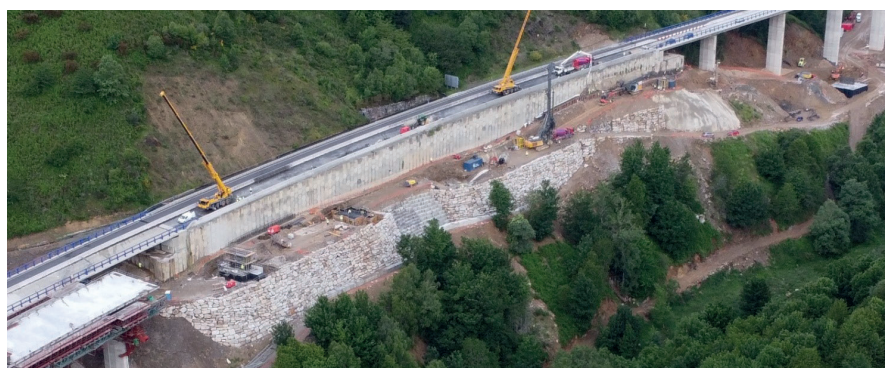


Figura 16. Vista general de las obras realizadas en la zona del muro de suelo reforzado.

que se ha hormigonado sobre un encofrado.

Una de las mayores dificultades de la obra ha sido la reconstrucción de los viaductos, con los condicionantes de tener ambas calzadas a media ladera, cuyas afecciones mu-

tuas obligaron a acometer las obras de emergencia en ambos sentidos de manera conjunta. Las dificultades del emplazamiento han requerido la construcción de unos muros de escollera y de bloques de hormigón, con tratamientos de micropilotes en

su base y en el cimiento del muro de suelo reforzado de la calzada sentido Madrid, que permitiesen tanto la necesaria estabilización de la ladera, como poder permitir el tránsito y emplazamiento de la maquinaria para la construcción de las cimentaciones del viaducto 'grande' en unas adecuadas condiciones de seguridad para los usuarios de la autovía A-6 y de los trabajadores durante las obras.

La solución indicada finalmente adoptada en esta zona ha conseguido combinar la mejora de la estabilidad requerida en la ladera, con las necesidades de accesos y posicionamiento de maquinaria durante las obras, con unos futuros caminos de mantenimiento y una adecuada integración ambiental.

3.2. Descripción del proceso constructivo de reconstrucción

La reconstrucción de los viaductos se ha realizado de una manera convencional, pero adecuada a las particulares características de cada una de las estructuras y sobre todo a la dificultad de acceso del entorno en el que se sitúan, y se puede resumir en las siguientes etapas:

- Ejecución de las cimentaciones de pilas y estribos de tipo directo o profundo mediante micropilotes o pilotes y sus encepados, en función de las características geotécnicas del terreno en cada caso.
- Ejecución de las pilas mediante el empleo de encofrados trepantes desplazados mediante grúa con trepas "tipo" de 5 m de altura.
- Colocación de apoyos, en general de tipo elastomérico a excepción de las pilas extremas y los estribos del "grande", así como en los estribos del viaducto "me-



Figura 17. Ejecución del viaducto pequeño mediante cimbra porticada.



Figura 18. Ejecución del viaducto grande mediante cimbra móvil autolanzable.

diano" en los que se han dispuesto apoyos de neopreno confinado (tipo POT).

- Ejecución de los tableros:
 - o Viaducto pequeño: mediante cimbra porticada en tres fases.
 - o Viaductos mediano y grande: mediante cimbra móvil autolanzable (autocimbra) por debajo del tablero.

Para ambos viaductos, e independientemente del medio auxiliar empleado, la sección transversal se ejecutaba inicialmente el ala inferior del cajón junto con las almas laterales y posteriormente la losa superior del tablero.

4. Puntos clave para la durabilidad de la estructura

4.1. Durabilidad de hormigones

Los viaductos del Castro son estructuras de montaña con condiciones ambientales extremas y con uso intensivo de salmuera y sales fundentes en plataforma durante las campañas de vialidad invernal para asegurar el correcto servicio de la vía. Estos condicionantes han sido determinantes en la estrategia de durabilidad del proyecto de los nuevos viaductos, de acuerdo con el capítulo 7 del Código Estructural, el capítulo 4 del Eurocódigo 2 (UNE-EN

Tabla 1. Hormigones empleados en la obra.								
Material	Elemento	Tipo de hormigón	Clase de resistencia a compresión	Tamaño máximo de árido [mm] (1)	Clase de exposición	Rec. Nominal [mm] (2)	Max. Rel A/C (3)	Cont. Min. Cemento [kg/m³] (3)
Hormigón prefabricado	Prelosa prefabricada pilas y tablero	Armado	C30/37	20	XC4	20	0,55	300
Hormigón in-situ	Tablero	Pretensado	C50/60	20	XC4+XD3+XF4	50	0,45	325
	Cabecero	Armado	C50/60	20	XC4+XD3+XF4	55	0,45	325
	Alzado de Pilas	Armado	C35/45	20	XC4+XD3+XF2	55	0,50	325
	Alzado de pilas en contacto con terreno natural	Armado	C35/45	20	XC2+XD3+XF2+XA 1	60	0,50	325
	Estribos	Armado	C35/45	20	XC2+XD3+XF4+XA 1	60	0,50	325
	Muros	Armado	C30/37	20	XC2+XD3+XF2+XA 1	60	0,50	325
	Encepados de pilas	Armado	C30/37	20	XC2+XA 1	60	0,50	325
	Pilotes	Armado	C30/37	20	XC2+XA 1	75	0,5	325
	Hormigón de limpieza y nivelación	No estructural	C12/15	30	X0	-	-	150

1992-1-1) y la norma de producto de hormigones estructurales UNE-EN 206:2013+A2 (tabla 1 del apartado 4.1). Además, se han tenido en cuenta las recomendaciones de las Series Guías de los Eurocódigos ² de la Dirección General de Carreteras.

Los recubrimientos de las estructuras de hormigón armado o pretensado se han establecido a partir de las clases de exposición de la estructura definidas para cada elemento, así:

- La clase de exposición del hormigón estructural de los nuevos tableros es XC4+XD3+XF4, que es igualmente de aplicación para los nuevos estribos y la cabeza de pilas.
- En el resto de los alzados de pilas y muros se ajustaría la clase de exposición de XF4 a XF2.
- En las zonas enterradas de alzados de pilas, estribos y muros se ha dispuesto una impermeabilización específica de estos paramentos en contacto con el material de relleno de las excavaciones, que no presenta agresividad.

- Para las cimentaciones (en contacto con terreno natural) del lado de la seguridad se ha considerado una clase de exposición XC2+XA1, si bien la dosificación empleada también verifica del lado de la seguridad los requisitos para XA2 y XA3.
- Para la superficie interior del cajón de los nuevos tableros se ha considerado ajustar la clase de exposición a XC4, dado que no son esperables fenómenos de corrosión asociados a cloruros, ni a ataques hielo/deshielo en el interior del cajón. Esta clase de exposición se tuvo en cuenta en la definición de los recubrimientos de las armaduras en la superficie interior del tablero.

En resumen, los hormigones empleados en la obra han sido los que se indican en la Tabla 1.

En los hormigones, se ha definido, además, una clase de contenido en cloruros Cl 0.40 en todos aquellos elementos de hormigón armado que se reduce a Cl 0.20 si los elementos están expuestos a clase de exposición XD o XS; y clase de contenido en cloruros Cl 0.20 en todos aquellos

elementos de hormigón armado que se reduce a Cl 0.10 si los elementos están expuestos a clase de exposición XD o XS.

Se han empleado los siguientes cementos:

- En cimentaciones y alzados de estribos cementos tipo IV/A (V) 42,5R SR.
- En los alzados de pilas, así como en los tableros cemento tipo I 52,5R con aditivo al 2,5% Sikatell 250, con unas mejoras de prestaciones equivalentes a las del humo de sílice.

Todos los hormigones han contado con un mezclado adecuado de los componentes. Finalmente se ha exigido que el hormigón de alzados de pilas y tableros incluya aditivos tipo aireantes que aseguren un contenido mínimo de aire ocluido del 4.5%.

² Guía para las especificaciones técnicas del hormigón. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2022.

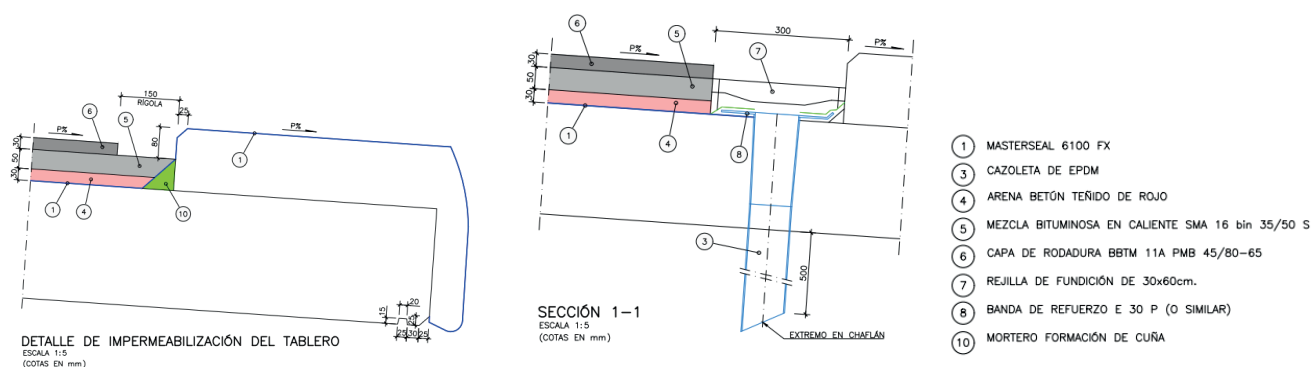


Figura 19. Detalles de remate de la impermeabilización y pavimento en general (izq.) y en zona de desagüe (der.).

4.2. Impermeabilización y sistema de desagüe del tablero

La impermeabilización del tablero es uno de los puntos clave para la protección de la estructura a largo plazo para evitar su deterioro debido a la filtración de sales fundentes durante las operaciones de vialidad invernal. Para ello, se han analizado las diferentes posibilidades de impermeabilización; optando inicialmente, por una solución de doble lámina asfáltica adherida a la superficie del tablero; que sin embargo evolucionó a un sistema de mortero cementoso por la necesidad de aplicación en unas condiciones climáticas adversas como se daban en el emplazamiento de los viaductos en el momento en el que se debían de llevar a cabo a cabo esta tarea de las obras de emergencia. A pesar de lo anterior, debido a la adversa climatología de la zona que la planificación de las impermeabilizaciones ha requerido de numerosas reprogramaciones y faseados en diferentes etapas.

El mortero cementoso empleado es el MASTERSEAL 6100 FX (actualmente Sikalastic®-6100 FX) que constituye una membrana mono-componente, a base de cemento, elástica y flexible, aligerada y de curado rápido para la impermeabilización y protección de estructuras de hormigón. La preparación

del soporte exigía una limpieza y humectación de la plataforma del tablero mediante agua a presión (200-300 bar) aplicada de arriba hacia abajo según la pronunciada pendiente del tablero. Una vez preparada la superficie, la aplicación del producto se realizaba proyectando con pistola tres capas con una dotación mínima de 0.90 kg/m² de mortero en polvo por capa y espolvoreando en la última de ellas, cuando está aún húmeda, árido sílice lavado de diámetro máximo de 2 mm con una dotación mínima de 1,5 – 2,0 kg/m².

La aplicación del mortero de impermeabilización no se limitó a la superficie del tablero, sino que se extendió a la altura total de los zócalos de los pretilos y en todo el perímetro de estos y de la imposta construida. Además, en la zona de muro de suelo reforzado entre los viaductos 'pequeño' y 'mediano' se aplicó igualmente a la cara interior de la barrera de hormigón in-situ para protegerla de las salpicaduras salinas.

La arista de intersección entre la superficie del tablero y el zócalo de los pretilos se suavizó mediante una cuña de mortero de forma que hubiera una transición suave entre superficies, cuidando particularmente la aplicación en estas zonas.



En todas aquellas zonas en las que se realizaba un solape en la aplicación del mortero de impermeabilización, y en particular en las juntas de construcción de los frentes de fase de cada vano, así como en aquellas zonas que supusieran una irregularidad detectable, se dispuso de una malla de fibra de vidrio con un ancho mínimo de 25 cm y un gramaje de 58 gr/m², para dotar a dichas zonas de una capacidad de puenteo suficiente.

Para proteger la impermeabilización avisando de su existencia en posibles operaciones de fresado o reparación puntual del pavimento, justo por encima de ella se ha dispuesto una mezcla AC11D con un contenido del 0,2% de pigmento de color rojo, solución ampliamente utilizada en países anglosajones y conocida como 'red asphalt sand carpet'.

4.3. Definición de las condiciones de accesibilidad para la inspección y el mantenimiento de la estructura.

En toda estructura resulta fundamental que sea accesible para inspección y mantenimiento, pero en el caso de estructuras afectadas por operaciones de vialidad invernal, más si cabe. Los nuevos tableros se han proyectado pensando en facilitar la ejecución de las labores de inspección y mantenimiento. En este sentido se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Se ha definido un canto del tablero de 2,70 m exteriores, que además de ser adecuado estructuralmente, permite dotarle de un gálibo interior de 2,10-2,20 m el cual se considera adecuado para permitir las labores de inspección y posibles trabajos de mantenimiento o reparación.
- Los cables de pretensado se han proyectado de tipo interno, evitando su presencia y posible interferencia en el interior del cajón; así como de sus elementos desviadores, dejando un paso completamente diáfano de cara a la inspección del tablero y fundamentalmente para el trasiego de materiales y maquinaria por el interior del cajón.
- Se han proyectado pasos de hombre en la losa inferior del cajón situadas en el eje de los mamparos de pilas para permitir el acceso y la inspección directa de las cabezas de pila y de los aparatos de apoyo. Las pilas presentan una plataforma central en su cabeza de forma que se puede acceder a ellas con una comodidad razonable.
- Los viaductos serán accesibles a través de ambos estribos, a través de puertas de acceso con cierre. Asimismo, se han proyec-

tado pasos de hombre tanto en pilas como en estribos que permiten el paso de un vano a otro haciendo que los viaductos sean transitables de estribo a estribo, tanto para personas como para maquinaria.

- Los nuevos tableros cuentan con un sistema de iluminación interior que facilite las tareas de inspección.

Además de las medidas adoptadas para el acceso y el mantenimiento, se han previsto los mecanismos y procesos necesarios para la sustitución de elementos fungibles como pueden ser las juntas o los apoyos.

Desde el punto de vista de acceso de agua al tablero, se ha proyectado evitando que el agua se quede en las superficies o escurra hacia paramentos horizontales 'en techo', mediante el empleo, por ejemplo, de impostas de protección adecuadas.

Finalmente, como se ha indicado en el apartado anterior, se ha colocado una capa de 'aviso' en el pavimento justo por encima de la impermeabilización.

5. Monitorización de la estructura

Con el objeto de controlar, tanto las condiciones de comportamiento estructural de los viaductos, como su potencial deterioro durable, se ha diseñado una monitorización de la estructura que permita conocer en tiempo real, ciertos parámetros clave que definen su comportamiento, correlacionándolos, además, con las variables meteorológicas que se producen en la zona. La instalación de un sistema de monitorización, permite, en particular:

- Advertir de cualquier señal de comportamiento anómalo durante el periodo de explotación, determinando la zona en que se produce, además de permitir la confirmación o corrección de los criterios adoptados para la corrección de dicho comportamiento.
- Efectuar un seguimiento continuo y preciso de las principales magnitudes que afectan al comportamiento de la estructura, de manera que puedan ejecutarse rápidamente cualquier tipo de medidas correctoras y comprobar su efectividad posterior.
- Disponer de una herramienta adicional de ayuda a la gestión de la explotación, permitiendo un conocimiento permanente del estado de la estructura.
- Obtener y transmitir un valioso conocimiento para el desarrollo de la ingeniería y diseño de estructuras de igual o semejante tipología, en cuanto al conocimiento de parámetros de diseño

La monitorización se conectará a la plataforma de monitorización de estructuras de la Red de Carreteras del Estado – CELOSÍA. Esta plataforma consta, básicamente, de un banco de datos, unas herramientas de postproceso y reelaboración de la información y un portal web de visualización gráfica y difusión de contenidos. Adicionalmente emite de manera automática una serie de alertas, cuando se superan determinados umbrales en los registros, o si el sistema se detuviera por algún incidente.

El objetivo de la plataforma no se reduce a materializar un mero repositorio de datos de las instrumentaciones, ni tampoco únicamente a facilitar un sistema de visualización común. Se persigue un objetivo de mayor alcance: crear en tiempo real

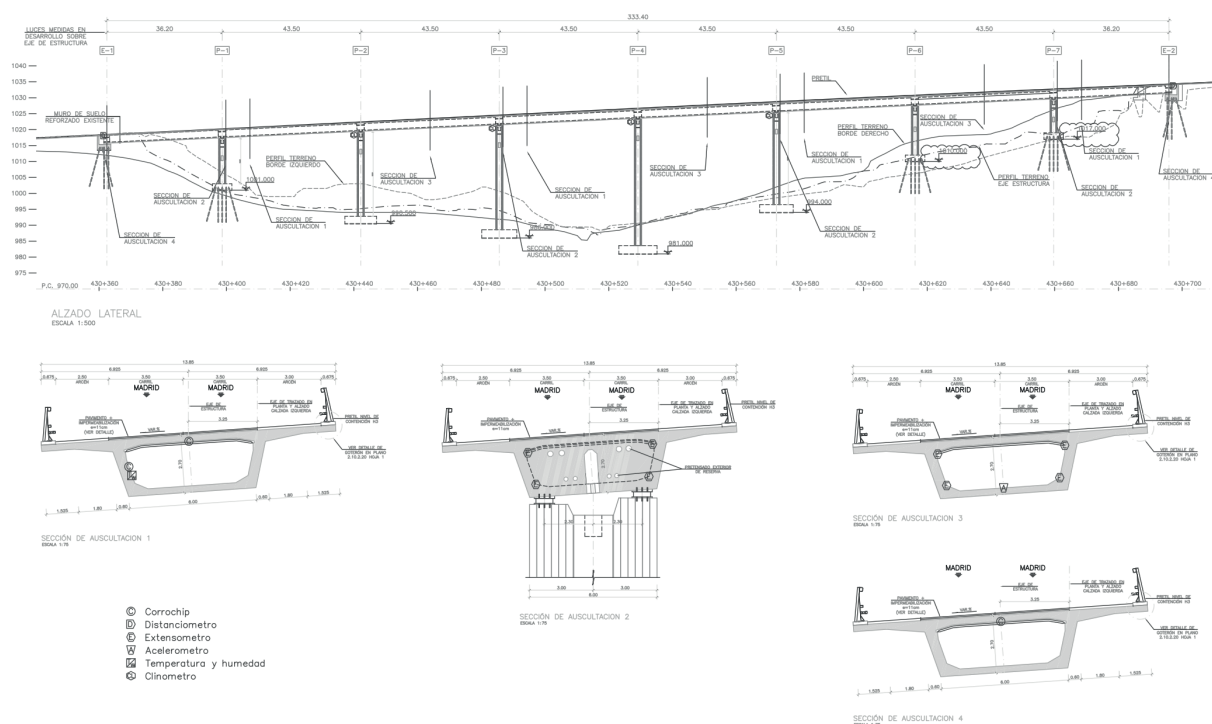


Figura 21. Plan de monitorización del viaducto mediano.

–integrando los datos registrados in situ con los algoritmos y criterios que se definan desde la DGC– una información de nivel superior que constituya un recurso útil para la toma de decisiones relativas a la construcción, mantenimiento o explotación de los puentes, taludes y otras estructuras de la Red de Carreteras del Estado.

Es decir, además de unificar y universalizar protocolos, formatos y procesos de cálculo, la Plataforma está orientada a permitir de forma ágil la vigilancia y seguimiento continuo de los comportamientos estructurales para facilitar la toma de decisiones.

5.1. Descripción de la monitorización

La instrumentación prevista tiene por objeto la obtención de datos referentes a las siguientes variables:

- Velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad ambiental, y pluviometría.
- Potencial y velocidad de corrosión de armaduras del tablero, tanto pasivas, como activas.
- Temperatura y humedad del tablero.
- Estado tenso-deformacional del tablero.
- Inclinación de pilas.
- Movimiento de juntas de dilatación.
- Aceleraciones del tablero

Cada uno de los parámetros anteriores se monitoriza mediante sensores ubicados en localizaciones previamente definidas. Estos sensores se han definido con unos requerimientos de rango de medición, precisión y resolución adecuadas a cada uno de los parámetros que se

pretenden medir. Las medidas de todos los sensores son de tipo estático, obteniéndose medidas discretas cada cinco minutos; excepto las correspondientes al viento y la acelerometría que son de carácter dinámico.

El sistema se completa con el correspondiente sistema de recogida y transmisión de datos mediante cableado desde los sensores hasta el equipo informático de adquisición de datos, que recibe las mediciones las almacena y las transmite al centro de tratamiento de datos que se ha dispuesto, con conexión con la Plataforma de Monitorización de Estructuras de la Red de Carreteras del Estado – CELOSÍA, que permite el acceso a la instrumentación a distancia vía web, de forma que se pueda acceder al conjunto de la información en tiempo real desde una localización remota.



Figura 22. Sensorización de la corrosión en armaduras pasivas preformigonado (izq.), postformigonado (cent.) y de armaduras activas (der).

5.2. Monitorización de la corrosión en el viaducto

Los viaductos del Castro han sido las primeras estructuras de la Red de Carreteras del Estado donde se ha instalado un sistema para la monitorización de la corrosión de las armaduras, tanto pasivas como activas, de la estructura. En particular, y con el objeto ponerlos en comparación, se han empleados dos sistemas diferentes, estos son el sistema de monitorización de la corrosión desarrollado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del CSIC y el sistema desarrollado por Witeklab y la Universidad Politécnica de Valencia.

Para evaluar en tiempo real el proceso de corrosión en hormigón armado y controlar la seguridad de las infraestructuras, ambos sistemas establecen la colocación de medidores de corrosión en el acero embebido en el hormigón que permitan detectar cuándo se inicia un proceso de corrosión, realizar un seguimiento en remoto del estado de la estructura a lo largo del tiempo y obtener información sobre la progresión de la corrosión. Mediante la interpretación de los procesos electroquímicos estos sensores proporcionarán parámetros de interés

como la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión o la resistencia del hormigón.

Los sensores se pueden implementar en la estructura durante el proceso de construcción, previamente al hormigonado o con la obra ya hormigonada.

6. Conclusiones

El presente artículo describe los criterios principales para el proyecto y reconstrucción de los nuevos viaductos del Castro. En particular se han establecido aquellos que permiten garantizar una durabilidad a largo plazo adecuada de estructuras viales emplazadas en zonas de montaña o alta montaña, y sometidas a operaciones recurrentes e intensas de vialidad invernal con uso de sales fundentes.

Con la difusión de la problemática y de los criterios particulares aplicados en la reconstrucción de los Viaductos de Castro, se espera ahondar en la concienciación de los distintos agentes involucrados en las infraestructuras (administraciones, proyectistas, constructores, conservadores y explotadores) de la relevancia y singularidad que presentan las estructuras en zonas de alta montaña.

Una especial atención a las impermeabilizaciones, los elementos de drenaje, las tipologías estructurales, los materiales, recubrimientos, así como a las tareas de inspección y conservación son imprescindibles para poder garantizar un correcto desempeño y funcionalidad de las estructuras en estos emplazamientos. ❖