

PROTECCIÓN POR FASES FRENTE A LA DEGRADACIÓN DE UNA ESTRUCTURA EN ANDORRA POR USO DE SALES DE DESHIELO

ALBELDA CUADRA, RAÚL
Proyectos de construcción, Globalvía, España
ralbelda@globalvia.com
RODRÍGUEZ, JOAN LLUIS; TRIAS PATOUT, CHRISTOPHE
Concesión Túnel d'Envalira, Andorra
jrodriguez@tenvalira.ad; ctrias@tenvalira.ad
GARCÍA GUILLOT, MARTA
Asesor en durabilidad; Codyatec, España
martagarciaqui@gmail.com
ARIAS HOFMAN, GONZALO
Dep. de Ingeniería de Conservación, INES Ingenieros, España
gah@inesingenieros.com

RESUMEN

En el actual contexto económico, los gestores de las carreteras analizan en detalle sus presupuestos en busca de eficiencias y optimizaciones. En particular, las partidas destinadas al mantenimiento y conservación ordinaria y extraordinaria de las estructuras también son objeto de esta revisión, incluso en entornos climáticos severos como es el caso de Túnel de Envalira, en Andorra.

Bajo la premisa de este congreso "La vialidad invernal en tiempos de crisis" se presenta un ejemplo de cómo abordar por fases la reparación de un puente situado en Pas de la Casa (Andorra), para evitar los problemas de corrosión y degradación del hormigón debido al uso masivo y continuo de sales de deshielo, priorizando las actuaciones en función de la temporada del año en que se puede realizar tareas de reparación y de los recursos disponibles cada año.

Palabras clave: sales de deshielo; estructura; corrosión; degradación; ensayos; rehabilitación; eficiencia;

1. INTRODUCCIÓN

La Concesión del Túnel d'Envalira se encuentra en el norte del Principado de Andorra y en la parroquia de Encamp. Esta Concesión, conformada principalmente por un largo túnel, atraviesa en su salida oriental el río Ariège mediante un viaducto prefabricado que conecta con la Route Nationale número 22 de Francia.

Tras los resultados de las inspecciones rutinarias efectuadas por la concesión Túnel d'Envalira según su propio Sistema de Gestión de Calidad y Medioambiente, en octubre de 2012 se realizó, tal y como aconsejaba la inspección rutinaria, una inspección especial y un estudio de la estructura con objeto de evaluar el estado actual de cada uno de los elementos de la misma y el previsible avance de los contaminantes mediante ensayos no destructivos. Dicho análisis fue contratado a la empresa INES, de dilatada experiencia en el análisis de patologías similares, y en él se establecieron las pautas de intervención por fases, delimitando las zonas y elementos que pudieran resultar más afectados y la metodología más adecuada para su posible reparación, teniendo en cuenta las

condiciones de durabilidad exigibles en el entorno tan agresivo en el que se encuentra el puente.

Con las patologías detectadas en las pilas, se decidió realizar unas actuaciones adaptadas a los plazos de tiempo disponibles, anticipando ciertas actuaciones antes de que el proceso de degradación avance y tenga unas consecuencias que obligarían a unas reparaciones de cuantía económica significativa. Se ha tratado de optimizar los recursos disponibles, planteando una ejecución por fases de las actuaciones propuestas. Las actuaciones recomendadas inicialmente tratan de evitar la presencia de agua como factor desencadenante de los procesos de degradación detectados, abordando en una segunda fase las reparaciones de los elementos más expuestos y degradados, que además tienen una mayor influencia sobre la seguridad vial, y finalizando, por último, con las actuaciones relativas a la protección del resto de elementos frente a los procesos de degradación, aumentando la durabilidad de los mismos.

Con este artículo se pretende mostrar un ejemplo de rehabilitación que se ha adaptado a la situación socioeconómica del momento, en la cual se requiere seguir manteniendo y protegiendo nuestras estructuras de forma viable. Esto, en líneas generales, demanda un conocimiento profundo y pormenorizado de la situación real de la estructura, lo que requiere ir más allá de la mera inspección visual, recurriendo a ensayos y técnicas especializadas. El análisis conjunto de toda la información permite un diseño de actuación particularizado para cada elemento de la estructura, aplicando soluciones más complejas y costosas exclusivamente en las zonas necesarias, delimitando perfectamente el nivel y tipo de actuación para cada zona y elemento. La línea argumental de este trabajo ha sido la conocida premisa de que a medio-largo plazo, resulta más eficiente invertir en el estudio y diseño de actuaciones, de forma que se optimice la intervención en cuantía y plazo, sin menoscabo de la seguridad que exige una infraestructura de la importancia de este viaducto.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SU DIAGNOSIS

2.1. Descripción de la estructura

Se trata de un viaducto de planta curva, de unos 225 m de longitud con 7 vanos de la misma luz (31,7 m). La estructura fue construida en el año 2002.

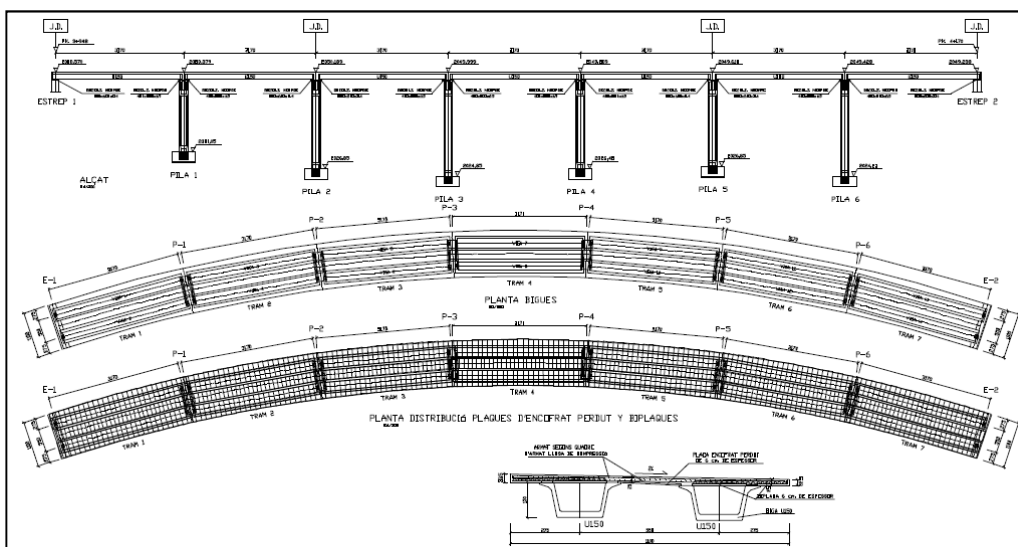


Figura nº 1. Plano general



Figuras nº 2 y nº 3. Vista inferior del viaducto hacia el estribo nº 1 y estribo nº 2

El tablero, de 11,00 m de anchura total, está constituido por dos vigas prefabricadas pretensadas de tipo artesa (1,50 m de canto y 3,24 m de ancho), con un intereje de 5,50 m. La losa de compresión, de hormigón armado, tiene un canto variable entre 22,5 y 33,5 cm, para conseguir una pendiente transversal del 2% (con caída hacia la cara sur del viaducto). El hormigón de las vigas es HP-45/F/20/IV+F, mientras que el de la losa de compresión es HA-30/F/20/IV+F. El tablero está rematado lateralmente mediante impostas metálicas de acero tipo cor-ten.

Las pilas consisten en un fuste único de sección rectangular hueca (3,00x2,50 [m]), de alturas variables, rematadas en su parte superior por un cargadero. El fuste, va "pinchado" mediante barras a la zapata o encepado (dependiendo de cada pila). Todos los elementos son de hormigón armado. El hormigón de todos los elementos de las pilas es HA-35/F/25/IIa. El cargadero consta de dos cuchillos unidos con una tabla en su parte superior y dos tablas laterales que coinciden con las caras laterales del fuste.

Las pilas nº 1, nº 4 y nº 5, cuyo encepado apoya en una mezcla de grava y tierra de productos descompuestos de pizarra, llevan cimentación profunda con micropilotes, mientras que las demás pilas llevan cimentación directa (las zapatas profundizan más hasta alcanzar las pizarras).

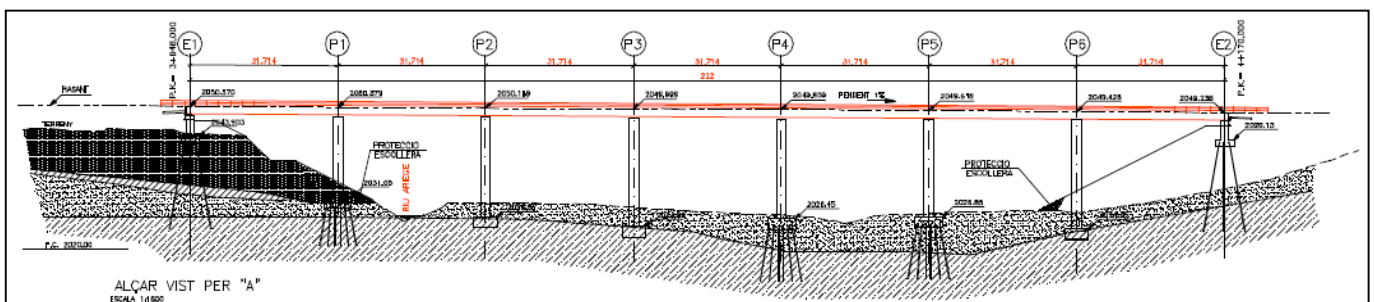


Figura nº 4. Plano de cimentación

Los estribos consisten en un cargadero sobre contrafuertes que empotran en un encepado. El encepado consta de una cimentación profunda a base de micropilotes. Ambos estribos tienen aletas en vuelta y solo el estribo nº 2 tiene un muro frontal de contención de las tierras por detrás de los contrafuertes. El hormigón de todos los elementos de los estribos es HA-30/B/30/IIa+H.

El puente tiene una junta de dilatación transversal interpuesta en ambos estribos y en las pilas nº 2 y nº 5, de tipo elastómero armado (según la clasificación establecida en el documento “*Juntas para puentes de carreteras*”; Asociación Técnica de la Carretera – AIPCR; 2003).

Los aparatos de apoyo son del tipo elastomérico (según Norma UNE-EN 1337 Parte 3, la definición dada en el documento referido, se trata de un “Apoyo que comprende un bloque de elastómero vulcanizado que puede reforzarse con una o más placas de acero”). Cada viga artesa está apoyada en un elastómero único en cada extremo, resultando un total de 28 aparatos de apoyo.



Figuras nº 5 y nº 6. Apoyo de viga izquierda en estribo nº 1 (izquierda) y de viga derecha en pila nº 2 (derecha)

La plataforma consta de una calzada única con un carril por sentido y arcenes, soportando el tráfico mediante pavimento asfáltico.

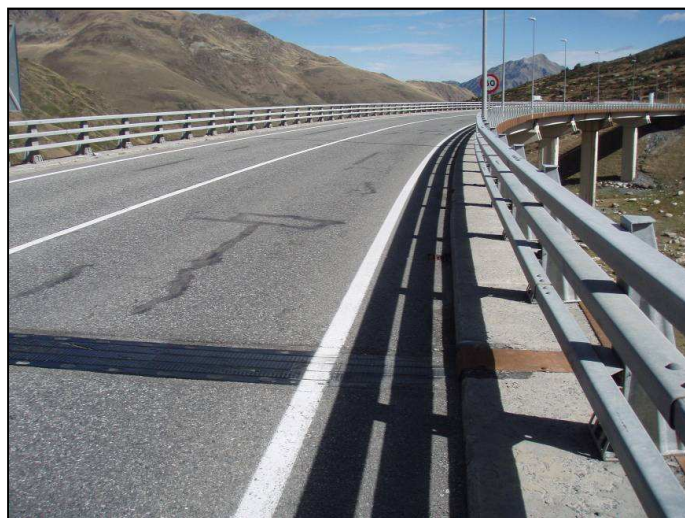


Figura nº 7. Vista superior del viaducto, desde el estribo nº 1

El sistema de contención consiste en un pretil metálico (nivel de contención H3) anclado a la losa de compresión del tablero. El zócalo en el que se ancla forma una especie de acera lateral. El sistema de drenaje del tablero consta de sumideros protegidos con rejillas y rematados inferiormente con tubos de desagüe de reciente ejecución (originalmente existía un tubo colector longitudinal, cuyos anclajes aún se aprecian bajo el voladizo derecho del tablero, que sufría numerosas roturas como consecuencia del peso del agua que quedaba alojada en el interior al congelarse).



Figuras n° 8 y n° 9. Tubo de desagüe en vano n° 4 (izquierda) y rejilla de protección del sumidero en vano n° 2 (derecha)

2.2. Patologías observadas

Los deterioros más relevantes se exponen a continuación:

1. **Corrosión de las armaduras y alteración del hormigón.** Como consecuencia de los ciclos hielo-deshielo y del agua con sales proveniente de la plataforma (alrededor de sumideros, entre placas de encofrado perdido y vigas, a través de las juntas de dilatación y por el extremo del voladizo), se produce una alteración de los paramentos de hormigón de las vigas, pilas y estribos. La alteración comienza por la pérdida de la pintura de protección de las vigas, continúa con la presencia de fisuras de escasa abertura como consecuencia de la corrosión de las armaduras y la aparición de pequeñas lajaciones en el hormigón que, posteriormente, dejan a la vista armaduras de los elementos afectados.

Los paramentos más castigados en las pilas son aquellos situados en la cara sur de la estructura, puesto que el peralte del tablero provoca que el agua caiga hacia este lado. Por otro lado, los vientos predominantes son de sur a norte en el valle que salva el viaducto, por lo que el agua afecta más a los paramentos orientados hacia el sur. Debido a la filtración de agua con cloruros (procedentes de las sales fundentes compuestas fundamentalmente por cloruro sódico), se desencadenan procesos de corrosión muy activos en las armaduras, que afectan a las zonas con mayor incidencia de humedades (orientación sur); dentro de estas se hacen especialmente patentes en las áreas de menor espesor de recubrimiento. Esta escasez de recubrimiento se ha registrado especialmente en las esquinas de algunos de los fustes, habiéndose detectado en una inspección ocular detallada que dicha falta de recubrimiento se había intentado paliar mediante un recrecido con sucesivas capas de mortero de reparación. Se ha comprobado que dichas capas están sufriendo una degradación, siendo una de las zonas más afectadas.

En general los espesores de recubrimiento son bastante variables, aunque si bien en algunas zonas son escasos (inferiores a 1 mm), en el resto superan los 25 mm y, puntualmente, incluso los 50 mm.

En muchos paramentos de la estructura se observa la degradación de la masa de hormigón, empezando por la alteración de la propia masa cementosa que se va microfisurando y perdiendo, dejando al aire los áridos, que posteriormente se despegan, produciendo la pérdida de material. Este efecto se debe a la acción conjunta y sinérgica de los ciclos hielo-deshielo y la cristalización de sales. Ambos efectos actúan fundamentalmente en las zonas más expuestas en las cuales escurre el agua con sales disueltas. Este efecto se observa de forma especialmente intensa en el zócalo del sistema de contención, principalmente en el lateral izquierdo, en el cual hay amplias zonas totalmente arenizadas (el responsable de conservación de la Concesión ha informado de recientes obras de reparación puntual de este zócalo). Aunque en menor medida también se observan zonas de hormigón degradadas en estribos.



Figuras nº 10 y nº 11. Alteración superficial del hormigón en vigas, con presencia de armaduras vistas de forma puntual



Figuras nº 12 y nº 13. Degradación del hormigón en estribo nº 2 (izquierda) y Alteración superficial del zócalo izquierdo del vano nº 1 (derecha)

2. **Presencia de eflorescencias y pátinas** en las vigas y voladizos del tablero, sobre todo en la zona derecha (debido al peralte del tablero, el agua tiene una mayor tendencia a salir por esta zona). La causa de estas eflorescencias, que anticipa de alguna forma el deterioro anterior, viene motivada por una precaria impermeabilización del tablero. En los puentes resulta muy habitual que a través de las juntas, en el borde del tablero o alrededor de los sumideros se filtre agua, pero resulta menos habitual que esto suceda a través de la losa de compresión (como se puede observar en las pátinas y alteración superficial entre placas de encofrado perdido y vigas), que se puede producir si existen defectos en la impermeabilización de la losa de compresión. Es necesario resaltar que a pesar de

las manchas de óxido, prácticamente no se encuentran armaduras expuestas, salvo en puntos muy localizados. La conclusión es que si, efectivamente, el sistema de drenaje actual consigue que el agua no resbale por los paramentos de hormigón con la intensidad con la que lo hacía desde la construcción del viaducto, la alteración de los elementos de hormigón será mucho más lenta o inexistente en los puntos donde se ha producido la mejora (alrededor de los sumideros y de las juntas).



Figuras nº 14 y nº 15. Detalle de lajaciones, pátinas, armaduras vistas y alteración superficial del hormigón en pie de pila nº 2 (arriba, izquierda) y detalle del cargadero de dicha pila (arriba, derecha)

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Una vez realizada una inspección detallada con medios de acceso adecuados para poder aproximarse a las zonas de mayor altura y cara inferior del tablero (cuyo resumen de daños se ha expuesto en el epígrafe anterior), se ha realizado un estudio de durabilidad que se resume a continuación, para analizar el grado de afección de los elementos por la presencia de sales de deshielo y otros agresivos.

De cara a evaluar la durabilidad de la estructura, es necesario tener en cuenta el ambiente en que se encuentra, determinando las posibles causas de ataque que puede estar experimentando. El viaducto se encuentra ubicado en una zona de alta montaña (por encima de los 2.000 de altitud con respecto al nivel del mar). En estas condiciones las temperaturas por debajo de los 0°C son frecuentes y permanentes durante largos periodos. Esto favorece la formación de hielo y obliga a la utilización de sales fundentes sobre el pavimento para facilitar la circulación vial. A priori, y sin hacer un estudio detallado de las condiciones específicas climáticas del viaducto objeto de este estudio, es de esperar que en él tengan lugar importantes ataques por efecto de ciclos hielo-deshielo, así como por la presencia de las sales fundentes empleadas para facilitar la vialidad invernal. Según lo observado en la inspección detallada de la estructura, los distintos elementos que constituyen el viaducto muestran deterioros producidos por la incidencia del medio agresivo en el que se encuentra, con sintomatología de daños relacionados todos ellos con la presencia de agua.

3.1. Caracterización de agresivos

De cara a evaluar la situación de la estructura, se ha hecho una determinación de los posibles agentes agresivos que pueden afectar a la durabilidad, desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras (cloruros y carbonatación). La determinación de cloruros se ha realizado en laboratorio, en muestras tomadas previamente en campo, mientras que la carbonatación se ha efectuado in-situ, en fractura reciente (catas puntuales).

- Determinación del avance del frente carbonatado. La determinación del avance del frente carbonatado o profundidad de carbonatación se ha realizado mediante adición de fenolftaleína, siguiendo la norma UNE 112011:2011. Una vez que el indicador ha tomado el color adecuado (incolore para pH inferior a 8, virando a color rojo púrpura a medida que el pH asciende), se mide el espesor de la capa carbonatada. La carbonatación se produce por reacción del dióxido carbónico del aire que penetra a través de la red de poros del hormigón, con los constituyentes alcalinos del cemento. Esto se traduce en un descenso acusado de pH, lo que provoca una pérdida de la pasividad de las armaduras embebidas en el hormigón.

Los avances máximos del frente carbonatado se producen con humedades comprendidas entre un 50 y 80%. En el caso de zonas de mayor humedad como es el caso del ambiente en que se encuentra el viaducto sobre el riu Ariège, los poros se encuentran saturados, lo que dificulta la difusión del CO₂. En zonas secas, la escasa cantidad de agua en los poros impide la disolución del CO₂ y por tanto la reacción de carbonatación.

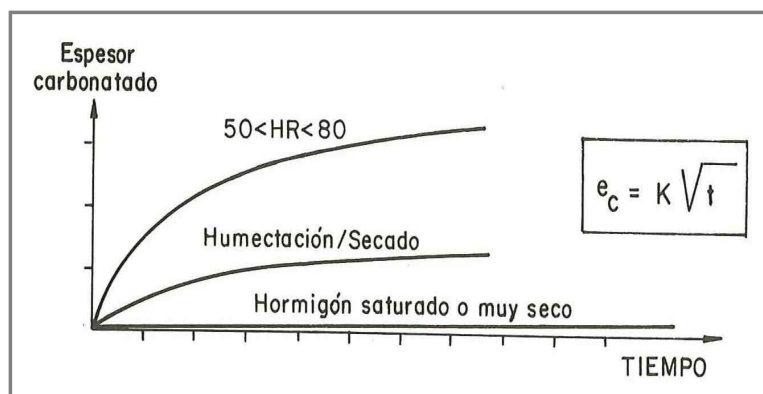


Figura nº 16. Avance del frente carbonatado en función del tiempo

Los datos obtenidos indican que la carbonatación es prácticamente nula en todas las caras de los fustes, por lo que haciendo este dato extensivo al resto de la estructura, se considera que la carbonatación no es el desencadenante de los procesos de corrosión que se registran.

Las siguientes figuras muestran el revelado del frente carbonatado en algunas de las determinaciones realizadas.



Figuras nº 17 y nº 18. Avance del frente carbonatado en pilas nº 2 y nº 3 respectivamente

- Determinación de cloruros.** De cara a la caracterización de los procesos de corrosión y también para establecer las oportunas recomendaciones de intervención, es necesario conocer si existen cloruros por encima de los límites admisibles, ya que elevados contenidos son perjudiciales para el hormigón armado, pudiendo desencadenar procesos activos de corrosión de las armaduras, incluso en el caso de hormigones no carbonatados. Un ataque por cloruros produce la rotura local de la capa pasiva que protege las armaduras, presentando una morfología de corrosión localizada o picadura. Los cloruros pueden provenir del exterior o estar en la propia masa de hormigón por haber sido adicionados en el hormigonado (como regulador de fraguado o como contaminante de alguno de los componentes, agua o áridos). La determinación del contenido de cloruros se ha realizado siguiendo la norma UNE 112010:2011, estando los porcentajes calculados con respecto al peso de hormigón. La determinación de cloruros se ha efectuado en 5 puntos localizados todos ellos en las pilas (4 en fuste y 1 en cargadero). La planificación del muestreo se ha efectuado de forma que sea representativa de la actual situación de la estructura, tomando puntos aparentemente dañados como sanos. Además, en las zonas más afectadas, las muestras se tomaron cubriendo un perfil de profundidad de aproximadamente 10 cm desde la superficie, con el fin de identificar el nivel de penetración del ataque por cloruros. Esto permite identificar con más precisión el nivel de limpieza o picado que hay que aplicar en las distintas zonas, en función de la situación real de los elementos de hormigón. El muestreo se realizó mediante perforación con brocas de distinto diámetro, recogándose la muestra en forma pulverulenta, diferenciadamente según intervalos de profundidad. De esta forma, las muestras denominadas “exterior” corresponden a un valor medio de cloruros correspondiente a un espesor entre 0 y 5 cm. Las muestras “interiores” se corresponden con profundidades de recubrimiento entre 5 y 10 cm. En la *Tabla nº 1* se recogen las muestras tomadas y los resultados obtenidos.

Tabla nº 1. Determinación de cloruros

LOCALIZACIÓN MUESTRAS	CLORUROS	
	INTERIOR	EXTERIOR
Fuste P1 S	0,04	0,74
Fuste P1 N	---	<0,01
Fuste P2 S	0,02	0,78
Fuste P2 N	---	<0,01
Cargadero P2 S	0,07	0,13

El límite máximo en cloruros prescrito por la EHE actualmente para un hormigón armado es de 0,4% con relación al peso de cemento, siendo la mitad para el caso de elementos pretensados*. Si se supone un hormigón de buena calidad (350-380 Kg de cemento por metro cúbico de hormigón), este límite se situaría aproximadamente en un 0,05-0,10% con relación al peso de hormigón, por lo que se ha tomado este valor como límite máximo admisible. En la *Figura nº 19* se muestra la concentración de cloruros determinada para cada una de las muestras. Como se puede observar, el contenido en cloruros de las muestras tomadas en la cara sur es claramente significativo (superior al 0,1 %), descendiendo a niveles despreciables en el interior (muestras "interior"). Sin embargo, ninguna de las muestras tomadas en la cara norte se encuentran contaminadas por este agresivo ($[Cl^-] < 0,01\%$). Además, la distribución de cloruros indica que este agresivo procede de las sales fundentes empleadas, no habiendo sido adicionado durante el hormigonado (regulador de fraguado o contaminante de alguno de los componentes). En la *Figura nº 20*, se han representado estos datos en forma de perfil.

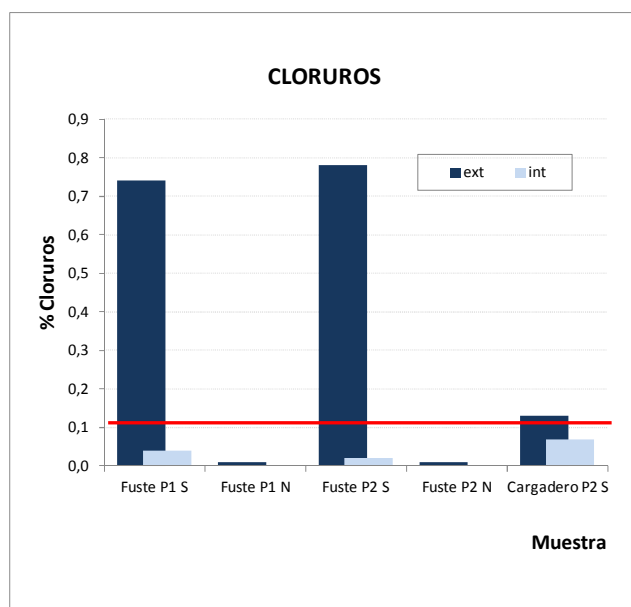


Figura nº 19. Datos de concentración de cloruros en el hormigón

Teniendo en cuenta esto, de cara a estimar la profundidad de saneo del hormigón en fustes, cargaderos y estribos, se considera necesario sanear un mínimo de 5 cm todas las zonas con manchas o pátinas que indiquen escurrimiento de agua, con el fin de eliminar el hormigón contaminado. Estas zonas son, básicamente:

- Paramentos de orientación sur en los fustes de todas las pilas
- Cargaderos de pilas nº 1, nº 2 y nº 5, en los paramentos sur y mitades sur de paramentos este y oeste
- Estribo nº 2 completo

Los paramentos de las vigas están afectados de forma mucho más superficial, y bastaría con una limpieza y protección en todas las áreas coincidentes con los sumideros (vigas derechas, próximos a las pilas) y en otras zonas puntuales de contacto entre placas de encofrado perdido y vigas.

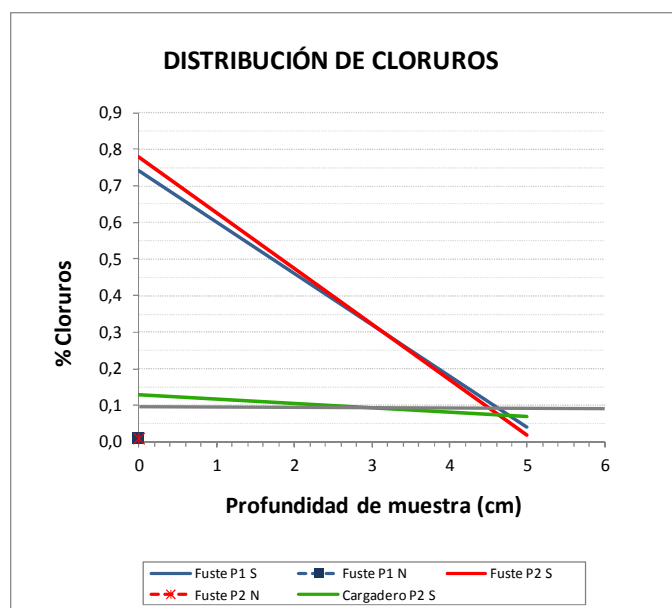


Figura nº 20. Distribución de cloruros en las muestras

3.2. Determinación de los parámetros de corrosión de armaduras

Con el fin de caracterizar el estado de corrosión de las armaduras, este estudio de durabilidad se complementa con el registro de los parámetros característicos de corrosión, los cuales, interpretados en su conjunto con los otros ensayos y determinaciones efectuados, permiten determinar las condiciones de la estructura. Los parámetros registrados han sido el potencial de corrosión de las armaduras y la resistividad eléctrica del hormigón, empleando para ello el equipo CANIN + de la marca PROCEQ. Las medidas de potencial se han realizado siguiendo el UNE 112083:2010 "Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado" y proporcionan información cualitativa sobre el riesgo de corrosión de las armaduras. La variación del potencial a lo largo de la estructura puede permitir identificar la presencia de zonas con o sin corrosión. Los límites de referencia establecidos por la normativa tanto española como internacional, se esquematizan en función del electrodo de referencia empleado (ver *Tabla nº 2*).

Tabla nº 2. Criterios para el potencial de corrosión

ELECTRODO	VALORES LÍMITE DE E_{corr} PARA RIESGO DE CORROSIÓN		
	< 10 %	\cong 50 %	> 90 %
Cu/CuSO ₄ saturado	> -275 mV	-275mV < E_{corr} < -425mV	< -425 mV
Calomelanos (ESC)	> -200 mV	-200mV < E_{corr} < -350mV	< -350mV

En este caso se han realizado las medidas con un dispositivo en rueda con electrodo de cobre saturado (Cu/CuSO₄ saturado), adoptándose por tanto los valores reflejados en la primera fila de la tabla anterior. Tal y como indica la tabla, valores más negativos de -425 mV Cu/Cu²⁺ indican una probabilidad mayor del 90% de que se esté produciendo un proceso activo de corrosión, valores más positivos de -275 mV Cu/Cu²⁺ indican una probabilidad del 90% de no corrosión, siendo incierta la probabilidad en el caso de valores situados entre -275 y -425 mV. Las determinaciones de potencial efectuadas se han

realizado en la cara sur y norte de los fustes de las pilas nº 1 (moderados daños por corrosión), nº 2 (correspondiente a junta, con importantes daños por corrosión) y nº 3 (escasos daños por corrosión), tratando de caracterizar las distintas situaciones en que se dan en la estructura. La localización de los registros es la siguiente:

PILA nº1:	Cara sur	Cara norte
PILA nº2:	Cara sur	Cara norte
PILA nº3:	Cara sur	Cara norte

A continuación se muestran una serie de figuras en las cuales se han recogido los 6 mapas de potencial realizados, los cuales engloban aproximadamente un total de 600 lecturas de potencial de corrosión. Los resultados obtenidos son claramente determinantes:

- Los registros efectuados en la cara norte indican pasividad de las armaduras (E_{corr} más positivo de -275 mV), lo cual es concordante con la ausencia de agresivos (cloruros y carbonatación despreciables) que desencadenen el proceso de corrosión.
- Los registros efectuados en la cara sur indican claramente corrosión activa en las zonas visualmente afectadas, lo que concuerda con los elevados contenidos de cloruros obtenidos en dichas zona, desencadenantes del proceso de oxidación.

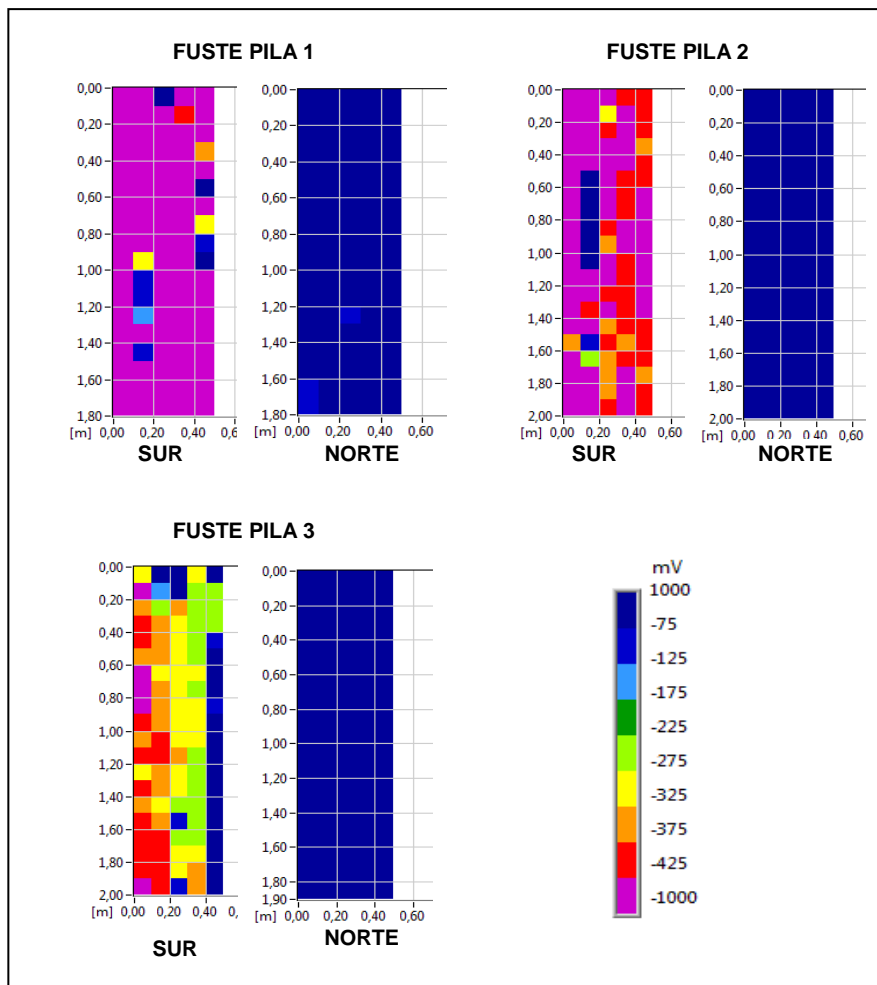


Figura nº 21. Mapas de potencial en caras norte y sur de las pilas nº 1, nº 2 y nº 3

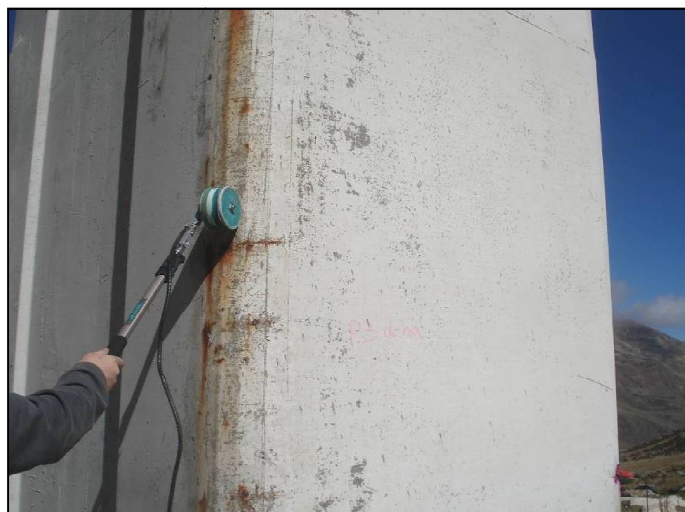


Figura nº 22. Registros de potencial de corrosión en cara sur de la pila nº3

Los resultados de resistividad eléctrica registrados, siguiendo los criterios recogidos en el Manual CONTECVET, son concordantes con el resto de los datos, ya que oscilan entre 50-100 Kohm·cm en la cara norte y son menores de 50 Kohm·cm en la cara sur. En la Tabla nº 3 se esquematizan dichos criterios.

Tabla nº 3. Criterios de resistividad

RESISTIVIDAD (Kohm x cm)	RIESGO DE CORROSIÓN
>100-200	corrosión despreciable
50-100	Bajo
10-50	moderado a alto

Con respecto a este parámetro, no existe normativa para medidas in situ, habiéndose empleado como referencia la norma UNE 83988-2:2008 “Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner”, aunque no incluye valores límites de referencia.

4. PROPUESTA DE PROTECCIÓN POR FASES

Dado que en el entorno climático en que se encuentra el puente los periodos de trabajo para la reparación de estructuras son reducidos, se han enfocado las actuaciones propuestas en una intervención por fases durante varias anualidades, y demás se optimizan los recursos disponibles en cada una de ellas:

- i. En primer lugar se pretende evitar la presencia de agua (factor desencadenante de los procesos de degradación detectados)
- ii. A continuación se abordan las reparaciones de los elementos más expuestos y degradados, con influencia sobre la seguridad vial
- iii. Finalmente se deben acometer las actuaciones relativas a la protección de los elementos frente a los procesos de degradación, con la intención de aumentar la durabilidad de los mismos

En el diseño de estas intervenciones, se asume como condicionante que el puente va a estar en contacto de forma permanente con agua y nieve contaminadas por sales de deshielo.

4.1. Actuaciones en primera fase: control del agua

En esta primera fase se plantean todas aquellas actuaciones destinadas a ejercer un control del agua, en el sentido de conseguir que ésta (contaminada inevitablemente por las sales empleadas en la vialidad invernal) tenga el mínimo contacto con los elementos del puente. Tras analizar los puntos críticos por los que se filtra o escurre el agua, se han tomado las medidas oportunas para conseguir el objetivo indicado.

A corto plazo se propone la colocación de una lámina de impermeabilización bajo todas las juntas de dilatación (actualmente sólo está colocada bajo la calzada derecha). Las juntas actuales pueden mantenerse todavía en servicio, aunque el elastómero de recubrimiento esté arañado. Se deben sustituir los anclajes de los tubos de desagüe a las vigas, puesto que al no ser galvanizados, su durabilidad es reducida. Finalmente, se propone la colocación de un vierteaguas en los extremos inferiores de ambos voladizos, para evitar que el agua que pueda escurrir desde la plataforma resbale por las placas de encofrado perdido y llegue a alcanzar incluso las vigas. En un futuro es recomendable, aunque sin la urgencia de las actuaciones anteriores, la aplicación de una impermeabilización de alta calidad en la cara superior de la losa de compresión (tipo termoplástico, doble membrana o poliurea) con sumideros adecuadamente sellados y protegidos. Es importante el detalle de prolongar la impermeabilización de alta calidad por el canto del zócalo del sistema de contención.

4.2. Actuaciones en segunda fase: reparación de elementos expuestos

Como segunda fase, en aquellos elementos en los que el agua y la nieve van a seguir teniendo contacto permanente (fundamentalmente los zócalos de hormigón del sistema de contención), se recomienda sanear y demoler el hormigón visto, llegando siempre hasta la armadura y eliminando las capas degradadas; saneando de armaduras y pasivando las mismas) y reconstrucción con mortero (tipo R2, según UNE EN 1504). Previamente al hormigonado, se recomienda que una vez limpiadas las armaduras, éstas sean protegidas con un producto con inhibidor de la corrosión (protección activa de las armaduras Principio 11, Método 11.1 UNE-EN 1504-9:2011). Dicho producto puede además actuar como puente de unión.

Es recomendable también aplicar un inhibidor de corrosión a la masa de hormigón, con el fin de establecer un sistema multicapas de protección. Este inhibidor será de tipo migratorio cuando se aplique al hormigón ya existente, aditivándose al hormigón que se emplee en la reconstrucción. En estos zócalos, una vez reparados, se recomienda aplicar también un sistema altamente impermeable tipo poliurea o similar (Principio 2, Método 2.2 UNE-EN 1504-9:2011).

4.3. Actuaciones en tercera fase: reparación del resto de elementos

En aquellos elementos sobre los que el agua no va a tener una incidencia tan permanente y dañina, se propone el saneo y reconstrucción de los paramentos de hormigón deteriorados, restituyendo el material eliminado o perdido y recreciendo los recubrimientos de armaduras en las zonas de escaso espesor hasta garantizar las condiciones durables tal y como se indica en la EHE-08, teniendo en cuenta las características y entorno agresivo de la estructura. En las pilas, más dañadas que el resto de elementos, se propone demoler hasta encontrar hormigón sano (a la vista de los ensayos realizados, se recomienda demoler un mínimo de 12 cm, llegando siempre hasta la armadura y eliminando las capas degradadas; sanear las armaduras y pasivar las mismas) y

reconstrucción con mortero (tipo R4, según UNE EN 1504). Previamente al hormigonado, se recomienda que una vez limpiadas las armaduras, éstas sean protegidas con un producto con inhibidor de la corrosión (protección activa de las armaduras Principio 11, Método 11.1 UNE-EN 1504-9:2011). Dicho producto puede además actuar como puente de unión. Es recomendable también aplicar un inhibidor de corrosión a la masa de hormigón, con el fin de establecer un sistema multicapas de protección. Este inhibidor será de tipo migratorio cuando se aplique al hormigón ya existente, aditivándose al hormigón que se emplee en la reconstrucción. En los paramentos reparados se recomienda aplicar un sistema altamente impermeable tipo poliurea o similar (Principio 2, Método 2.2 UNE-EN 1504-9:2011).

Para las vigas del tablero, se recomienda chorreado con arena de los paramentos afectados (con armaduras vistas, es necesario picar alrededor hasta descubrirlas, para sanearlas y pasivarlas y proceder a la reconstrucción con mortero tipo R4, según UNE EN 1504). En los paramentos reparados se recomienda aplicar un recubrimiento protector con características únicamente hidrofugantes, de cara a permitir la evaporación y eliminación de posibles filtraciones de agua (Principio 2, Método 2.1 UNE-EN 1504-9:2011). En los estribos se recomienda un saneo profundo en el estribo nº 2, en el que sería recomendable eliminar un mínimo de 10 cm de espesor de recubrimiento. Reconstrucción con mortero (tipo R4, según UNE EN 1504) y el empleo de protectores de armadura y hormigones con inhibidor de corrosión (seguir las indicaciones ofrecidas para las pilas). En los paramentos reparados se recomienda aplicar un recubrimiento protector con características únicamente hidrofugantes, de cara a permitir la evaporación y eliminación de posibles filtraciones de agua (Principio 2, Método 2.1 UNE-EN 1504-9:2011).

5. CONCLUSIONES

1. A partir de los trabajos realizados y la información analizada, se pueden extraer las siguientes conclusiones:
 - a. El Sistema de Gestión de la Calidad y Medioambiente de la concesión Túnel d'Envalira de Globalvía ha permitido detectar a tiempo y poner en marcha los mecanismos necesarios para analizar y evaluar el estado de conservación de éste viaducto que se puso en servicio en septiembre de 2002.
 - b. Se ha analizado el problema de degradación del hormigón localizado en determinados elementos del viaducto, como consecuencia principalmente de la corrosión de las armaduras y de la destrucción de la masa cementante del hormigón.
 - c. Como diagnóstico inicial se han definido como desencadenantes de los procesos degradativos en primer lugar la acción del agua con sales que provienen de las bajantes del tablero durante el invierno, y en segundo lugar, los ciclos hielo-deshielo que se producen de forma frecuente a lo largo del año.
 - d. La degradación del hormigón en las pilas ha sido debida a que los sumideros y bajantes del desagüe fueron ubicados en diseño justamente en la vertical de las pilas. El desagüe directo de las aguas del tablero sobre las propias pilas, ha acelerado el fenómeno de la degradación de estos elementos.
 - e. Los resultados de contenido de cloruros, mapas de potencial y resistividad del hormigón permiten identificar las zonas del puente más castigadas,

coincidiendo con los deterioros más visibles. Con respecto al contenido de cloruros, cabe destacar que los perfiles obtenidos (entre el interior y exterior de la masa de hormigón) confirman que el origen de aquellos son las aportaciones exteriores y permiten descartar un uso indebido en el agua de amasado

2. Los elementos más afectados son aquellos a los que llega (o ha llegado durante gran parte de su vida útil) el agua, que durante el periodo invernal baja desde la plataforma mezclada con sales como consecuencia de los necesarios trabajos de vialidad invernal. Los elementos afectados son: vigas, estribos, pilas y el zócalo del sistema de contención
3. Dentro de cada elemento, los daños se localizan en zonas singulares (en los extremos de las vigas, sobre las pilas en las que existe junta de dilatación y en los estribos, en la salida de los sumideros y en ciertos puntos en los que aparentemente se produjo la rotura del tubo colector longitudinal original; en las pilas, en las caras laterales de orientación sur, en todos los fustes y en algunos cargaderos; en los cargaderos y muros laterales de los estribos; en los dos zócalos del sistema de contención).

A partir de la identificación de los daños, sus causas y el alcance en los distintos elementos, se ha realizado una propuesta de actuación por fases para optimizar los recursos disponibles durante los años 2013-2015, según la siguiente programación:

- a. Eliminación, en la medida de lo posible, de la presencia de agua sobre los diferentes elementos del puente (trabajos ya iniciados en 2013)
- b. Protección y reparación de los elementos más expuestos: zócalo de hormigón armado de la plataforma (trabajos previstos entre 2013 y 2014)
- c. Reparación y protección de los elementos con menor exposición (tablero, estribos, pilas), si bien en el momento de la realización de la inspección y el estudio eran los elementos cuyo estado de conservación resultaba más llamativo (trabajos previstos para ejecutar en 2015)

En julio de 2013 Tunel d'Envalira ya había iniciado los trabajos encaminados a evitar la acción de agua con sales sobre los elementos afectados, acometiendo las primeras reparaciones sobre el tablero y cargaderos, de conformidad con lo descrito en el apartado 4.1 Actuaciones en primera fase.

REFERENCIAS - REFERENCES RÉFÉRENCES

1. Instrucción del Hormigón Estructural. EHE. Ministerio de Fomento. España. 2008.
2. UNE 112011:2011 "Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio".
3. UNE 112010:2011 "Corrosión en armaduras. Determinación de cloruros en hormigones endurecidos y puestos en servicio".
4. UNE 112083:2010 "Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado"
5. CONTECVET EC Innovation Programme; "Manual de evolución de estructuras afectadas por corrosión de la armadura".
6. UNE 83988-2:2008 "Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner".