

ESTUDIO DEL DETERIORO DE DIVERSOS TABLEROS DE HORMIGÓN EN PUENTES CON ZONAS DE INTENSA VIALIDAD INVERNAL.

A. NAVAREÑO

Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, España

anavareno@fomento.es

G. ARIAS

INES Ingenieros, España

gah@inesingenieros.com

E. CRIADO

Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, España

jecriado@fomento.es

M. GARCIA

Asesora Quimica, España

martagarciaqui@gmail.com

A. MENENDEZ.

GEOCISA S.A, España

abmenendezc@geocisa.com

RESUMEN

En este artículo se presentan esquemáticamente los resultados de 21 inspecciones especiales en puentes de cierta antigüedad de la Red de Carreteras del Estado, con deficiente impermeabilización, en lo relativo al estudio del deterioro de tableros de hormigón sometidos a bajas temperaturas (hielo deshielo) y a las sales fundentes de la carretera. Todas las estructuras seleccionadas tienen losa de compresión o tablero de hormigón armado.

Tras la inspección visual preliminar se realizaron in situ medidas de potencial siguiendo la norma UNE 122083 "Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado" que proporcionaron información cualitativa sobre el riesgo de corrosión de las armaduras. Se observó que los principales deterioros de las losas no se debían a la corrosión de sus armaduras, sino a la degradación del hormigón; por este motivo la investigación se centró en la determinación de los mecanismos físicos y químicos que pueden originar tales deterioros en el hormigón provocados por la acción del hielo-deshielo más las sales fundentes (sobre todo NaCl).

En los distintos testigos de hormigón extraídos para cada puente se realizó un análisis de durabilidad basado en los siguientes aspectos: Inspección visual, caracterización de los materiales (resistencias -rotura a compresión y ultrasonidos in situ- y compacidad -porosidad, densidad y absorción), estudio de los agresivos (carbonatación, cloruros y sulfatos) y estudio de la microestructura (difracción RX, microscopía electrónica RX BSE-EDX).

Los resultados nos aclaran un poco más, tras este pequeño muestreo, acerca de la severidad de este tipo de daños en tableros, y nos han permitido abrir una nueva línea de investigación en laboratorio, centrada en la afección del hielo-deshielo y las sales fundentes en hormigones de unos 20 años de antigüedad, cuya durabilidad frente a los agentes estudiados es bastante inferior a la de los hormigones actuales.

1. INTRODUCCIÓN. OBJETO DEL ESTUDIO

Ese estudio pretende analizar la afección de las bajas temperaturas y de las sales, aplicadas durante los tratamientos de vialidad invernal, a la durabilidad de los tableros de hormigón de los puentes de cierta antigüedad de la RCE, con la única impermeabilización del paquete de firme y con hormigones menos prestacionales que los actuales.

Para ello se han tomado dos series de puentes, una primera con estructuras que presentaban problemas evidentes en el tablero que afectaban por un lado a la armadura, como la corrosión, y por otro al propio hormigón, como la degradación, existencia de fisuras, o humedades; y una segunda serie, por estructuras que a priori no presentaban ninguna patología evidente, si bien estaban expuestas a condiciones meteorológicas similares.

Según la información facilitada por distintas Unidades de Conservación de la Dirección General de Carreteras, los datos de utilización de sales fundentes indican un aporte importante de sal sobre las losas que podría oscilar entre los siguientes valores:

- En las estructuras situadas en puertos de montaña como la N-502 en Ávila o N-630 en León: en el periodo invernal (de noviembre a abril) la cantidad de fundente extendido en el tablero supone aproximadamente unos 7 Kg/m²
- Resto de estructuras: el periodo invernal es algo más corto y menos intenso, se ha obtenido un consumo medio que es del orden de 2 Kg/m².

Con estos datos y teniendo en cuenta que en las carreteras la temperatura en la zona de la losa de los puentes es inferior a la de la explanación, debido a la mayor permeabilidad transversal de los mismos, se escogieron estructuras de diversos puntos de la RCE con exposición ambiental IIa ó IIb, + H o F, según la EHE-08, es decir ambientes de clase normal, de humedad alta o media, expuestas a lluvias en zonas con precipitación media anual alrededor de 600 mm, y expuestas al hielo y a los fundentes (en este sentido se confiere un cierto nivel de impermeabilidad al tablero al encontrarse bajo el firme)

Además se pretende también establecer y validar una metodología de estudio e inspección, de muestreo y de ensayos, que permitan comparar los daños y las causas que intervienen en la determinación de la durabilidad de las losas de los tableros de hormigón de puentes antiguos sometidos a la meteorología adversa ya citada y con una baja o nula impermeabilización. Estas losas por ser la parte más expuesta a la entrada de sales, en puentes antiguos, se sitúa en el primer nivel del estudio, previo al reconocimiento de otras partes del puente.

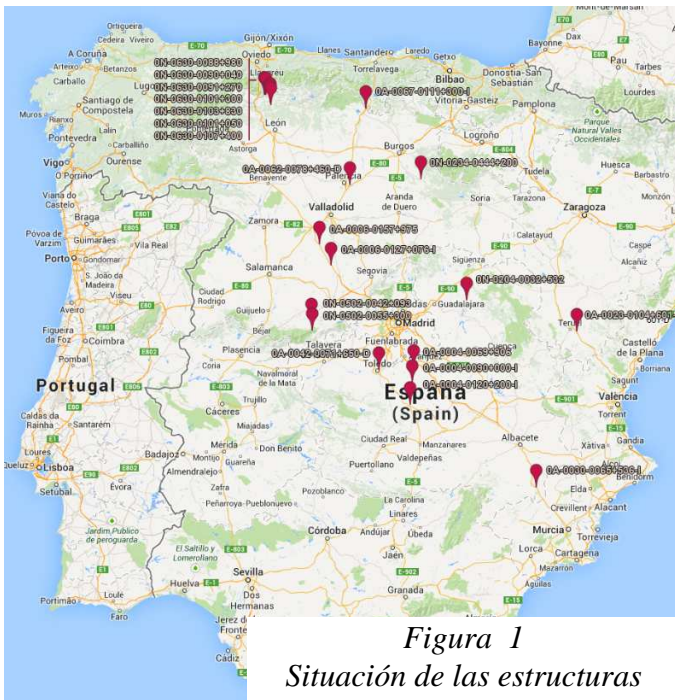
2. DESCRIPCION DE LOS PUENTES

Para la realización de este estudio, se han seleccionado 21 estructuras de distintas ubicaciones (Ávila, Albacete, Burgos, Guadalajara, León, Palencia, Teruel, Toledo y Valladolid). Dentro de estas localizaciones, el muestreo se realizó tratando de que incluyeran en la medida de lo posible:

- diferentes edades de estructuras
- localizaciones en zonas con distinta climatología y por tanto distinta frecuencia de utilización de sales fundentes

- distinta tipología de tablero
- losas de hormigón con distintos grados de afección (aparentemente sanas y con daños)

En la siguiente tabla e imagen aparecen las estructuras seleccionadas:



Nº	Codigo	Carretera	PK	Provincia
1	0N-0502-0042+093	N-502	42+100	Avila
2	0N-0630-0088+980	N-630	88+890	León
3	0N-0630-0090+040	N-630	90+025	León
4	0N-0630-091+270	N-630	91+100	León
5	0N-0630-101+300	N-630	101+500	León
6	0N-0630-103+830	N-630	103+850	León
7	0N-0630-0107+400	N-630	107+890	León
8	0A-0067-0111+300	A-67	111+400	Palencia
9	0A-0004-0120+200-I	A-4	120+200	Toledo
10	0N-0630-101+050	N-630	101+100	León
11	0A-0004-0090+000-I	A-4	90+000	Toledo
12	0N-0234-444+200	N-234	445+150	Burgos
13	0A-0062-0078+460	A-62	78+400	Palencia
14	0A-0006-0127+076	A-006	127+180	Avila
15	0N-0502-0055+300	N-502	55+350	Avila
16	0A-006-0157+975	A-6	157+840	Valladolid
17	0A-0004-0069+906	A-4	69+906	Toledo
18	0A-0023-0104+601	A-023	104+750	Teruel
19	0A-0030-0065+536-I	A-30	65+600	Albacete
20	0N-0204-0032+532	N-204	32+532	Guadalajara
21	0A-0042-0071+650+D	A-42	71+500	Toledo

Las estructuras estudiadas pueden agruparse por tipología del tablero y edad de la siguiente manera:

A. Puentes de vigas de hormigón armado, de un vano, soportando una carretera de 1+1 carriles, construidos entre 1965 y 1980.

Código	carretera	p.k	tipología
0N-0630-0088+890	N-630	88+890	9 nervios
0N-0630-0090+040	N-630	90+025	7 nervios
0N-0630-091+100	N-630	91+100	5 nervios
0N-0630-101+300	N-630	101+500	14 vigas losa superior
0N-0630-103+850	N-630	103+850	14 vigas losa superior
0N-0630-101+050	N-630	101+100	losa de hormigón



Figura 2 Puentes tipo A

B. Puentes de vigas de hormigón armado, de varios vanos, soportando una carretera de 1+1 carriles, construidos entre 1965 y 1980

Código	carretera	p.k	tipología
0N-0630-0107+400	N-630	107+890	3 vanos: 6 vigas
0N-0234-444+200	N-234	445+150	5 vanos: Losa nervada y ampliación de 6 vigas
0N-0502-0042+093	N-502	42+100	9 vanos: 6 vigas
0N-0502-0055+300	N-502	55+350	4 vanos: 4 vigas r
0A-0067-0111+400	A-67	111+400	3 vanos: 4 vigas
0N-0204-0032+532	N-204	32+532	6 vanos



Figura 3 Puentes tipo B

C. Puentes tipo losa de hormigón armado, de varios vanos, construidos entre 1980 y 1995.

Código	carretera	p.k	tipología
0A-0062-0078+400	A-62	78+400	3 vanos tipo losa continua
0A-006-0157+975	A-6	157+840	4 vanos: losa continua de hormigon



Figura 4 Puentes tipo C

D. Puentes de vigas de hormigón armado, de varios vanos, soportando la calzada de una autovía de 2 carriles por sentido, construidos entre 1990 y 2000.

Código	carretera	p.k	tipología
0A-0004-0069+906	A-4	69+906	4 vanos: 2 vigas artesas
0A-0004-0090+000-I	A-4	90+000	1 vano: 6 vigas
0A-0004-0120+200-I	A-4	120+200	8 vanos: 8 vigas
0A-0042-0071+650-D	A-42	71+500	9 vanos: sección cajon
0A-0006-0127+077	A-006	127+180	5 vanos: 9 vigas
0A-0030-0065+536-I	A-30	65+600	16 vanos con 4 vigas
0A-0023-0104+601	A-023	104+750	5 vanos: sección cajon



Figura 5 Puentes tipo D

3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Para poder realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en las diferentes estructuras, se ha implantado una metodología de estudio, que permite obtener una información relativamente completa, homogénea y fiable de la severidad de los posibles daños causados por las bajas temperaturas y por las sales fundentes a las losas de tableros de hormigón, tanto a las armaduras, por su posible corrosión, como a la degradación del hormigón. A continuación se describe brevemente la metodología empleada

3.1 Recopilación de datos

El primer paso es recopilar toda la información sobre la estructura, respecto a las características de la misma, ambiente en el que se encuentra y tratamientos de vialidad invernal a los que se ve sometida, siendo conveniente incluir al menos lo siguiente:

- Código y fichas de inventario e inspecciones si las hubiera.
- Localización geográfica.
- Proyectos de ejecución, incluyendo planos de estructura y tipo de hormigón, dosificaciones, aditivos, etc. fundamentalmente los relativos al tablero.
- Trazado de la carretera sobre el puente, para distinguir el grado de exposición.
- Climatología local.
- Régimen de utilización de sales fundentes, datos de procedencia y composición.

3.2 Inspección visual y establecimiento del nivel de muestreo y ensayos.

Esta inspección previa se realiza con el fin de establecer el estado de las estructuras, determinando la presencia o no de posibles deterioros en las losas de puente, tanto desde el punto de vista de las afecciones del hormigón como de las armaduras. En función de los daños o alteraciones que se determinen la losa se clasificará como aparentemente sana, con un NIVEL 1 de muestreo y ensayo, o bien como NIVEL 2, en el cual se evidencian daños o alteraciones.

3.3 Realización de la toma de muestras.

En función del nivel establecido a partir de la inspección visual se actuará siguiendo las siguientes pautas:

- **NIVEL 1:** establecimiento de tres puntos de muestreo distribuidos sobre la losa de la siguiente manera:
 - T1: lateral derecho próximo a estribo 1.
 - T2: lateral izquierdo próximo a estribo 2.
 - T3: centro de tablero (tanto longitudinalmente como transversalmente).

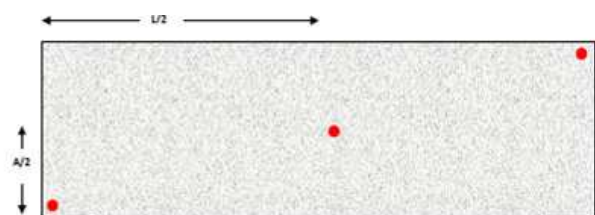


Figura 6
Muestreo Nivel 1 en Losa

- **NIVEL 2:** el muestreo es más intenso y el número de muestras depende del tamaño de la losa así como de la presencia de posibles zonas de deterioro. Como mínimo, las muestras tomadas en función de la superficie del tablero serán:

Los testigos se localizan según la distribución siguiente:

- T1: lateral derecho próximo a estribo 1.
- T2: lateral izquierdo próximo a estribo 2.
- T3: centro de tablero (tanto longitudinal como transversalmente).
- T4: a 1/4 del estribo 1 en sentido longitudinal y a 1/3 del lateral izquierdo.
- T5: longitudinalmente a 1/4 del estribo 2 y a 1/3 del lateral derecho.

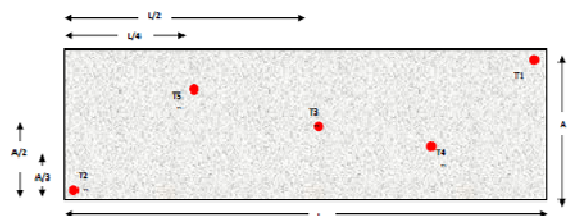


Figura 7
Muestreo Nivel 2 en Losa <1000m²

Losas de superficie superior a 1000 m²:

En este caso, la localización de los testigos, con independencia del número de vanos o de la longitud del tablero, se fija para cada vano estableciendo un testigo en el centro (tanto en sentido longitudinal como transversal) y otro en el extremo (al tresbolillo), situando siempre sendos testigos en las proximidades de los estribos. Además, con el fin de poder estudiar el estado de las armaduras y los parámetros asociados a ella, se realizan catas de aproximadamente 1 m² cada una de ellas:

- Para NIVEL1: se realiza una única cata.
- Para NIVEL 2: se realizan dos catas representativas de los daños.

En cada puente, se toman también muestras de las sales fundentes empleadas, recogidas en los Centros de Conservación implicados.

3.4 Realización de ensayos

Los ensayos considerados en esta metodología se enfocan a determinar las posibles alteraciones tanto del hormigón como de las armaduras, realizándose parte de ellos in situ mientras que otros se efectúan en laboratorio, sobre las muestras tomadas.

Para las estructuras con **NIVEL 1** de muestreo y ensayo son:

- En las catas los ensayos a efectuar son in-situ y consisten básicamente en:
 - Caracterización visual del hormigón.
 - Estado de las armaduras (aspecto y registro del potencial de corrosión y la resistividad eléctrica del hormigón).
 - Espesores de recubrimiento.
 - Revelado del perfil de neutralización de la basicidad (medida carbonatación).
- En los testigos extraídos con sonda rotativa, se realizan los siguientes ensayos:
 - Caracterización visual del testigo: en todos los testigos.
 - Perfil de cloruros a 2 profundidades: en todos los testigos.
 - Determinación analítica de sulfatos, sodio y potasio: en todos los testigos.
 - Revelado del perfil de neutralización de la basicidad: en todos los testigos.
 - Determinación de la compacidad del hormigón mediante ensayos de porosidad, absorción y densidad: en 1 de los testigos extraídos.
 - Determinación del contenido en cemento en el hormigón: en 1 único testigo.
 - Determinación de la resistencia a compresión: en 1 de los testigos extraídos.
 - Determinación micro-estructural del hormigón mediante ensayos de microscopía electrónica: en 1 único testigo. Este ensayo además, permitirán determinar la presencia de posibles procesos degradativos de tipo expansivo (formación de ettringita y reacciones árido-álcali, etc.).

Para las estructuras con **NIVEL 2** de muestreo y ensayo, se realizan todos los ensayos descritos para el nivel 1, aumentando el número de muestra en los siguientes casos:

- Determinación de la compacidad del hormigón mediante ensayos de porosidad, absorción y densidad: en la mitad de los testigos extraídos.
- Determinación de la resistencia a compresión: en todos los testigos.
- Determinación micro-estructural del hormigón mediante ensayos de microscopía electrónica. En 2 de los testigos

En el nivel 2 se toman muestras de sal fundente, y se analizan los valores de: Cloruros, Sulfatos, Sodio, Potasio, Magnesio, Nitratos, Nitritos y Calcio.

3.5 Informe de los trabajos

Una vez finalizados todos los trabajos, se elabora el correspondiente informe final donde se describen los trabajos realizados y resultados obtenidos, con documentación fotográfica y recomendaciones de actuación en cada estructura.

4. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE ENSAYOS REALIZADOS.

A continuación se realiza una breve descripción de los ensayos realizados, del objetivo de los mismos y de los resultados obtenidos, tanto en las estructuras de nivel 1 (estructuras sin patología) como en las estructuras de nivel 2 (estructuras con patología).

4.1 Caracterización visual del hormigón.

La caracterización visual del hormigón, por personal experto, es un parámetro muy importante que aporta datos muy útiles que pueden orientar acerca de la patología existente en el puente. Si embargo no hay que olvidar que se trata de datos cualitativos que hay que confirmar con los correspondientes ensayos sobre materiales.

En la imagen de la derecha, figura 8, se puede ver un hormigón de un nervio de una viga con fisuras, desconchones, manchas de corrosión, precipitados de hormigón, que indican acerca de daños importantes en el mismo.



Figura 8
Estructura n°2; N-630, p.k 88

Los principales deterioros encontrados en los puentes analizados son las humedades, descascarillados por hielo-deshielo, eflorescencias, desconchones, fisuras y armaduras vistas con corrosión, destacando que en los puentes de nivel -1, lógicamente a priori, el estado visual del hormigón era relativamente bueno.

4.2 Estado de de las armaduras.

Unos de los datos más importantes a valorar es el estado de protección y pasivación de las armaduras, ya que la oxidación de las mismas se traduce en una pérdida de sección, figura 9, que reduce la capacidad estructural del puente.

Se puede determinar con un ensayo destructivo y puntual como es la apertura de una cata para ver visualmente la armadura o mediante un ensayo no destructivo como es la medida del potencial de corrosión.



Figura 9
Estructura n°2; N-630, p.k 88

En este ensayo las medidas de potencial se han realizado siguiendo la UNE 122083 "Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado" que proporcionan información cualitativa sobre el riesgo de corrosión de las armaduras ya que la variación del potencial a lo largo de la estructura puede permitir identificar la presencia de zonas con o sin corrosión. 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 figura 10.

ELECTRODO	VALORES LÍMITE DE E_{corr} PARA RIESGO DE CORROSIÓN		
	< 10 %	≈ 50 %	> 90 %
Cu/CuSO4 saturado	> -275 mV	-275mV < E_{corr} < -425mV	< -425 mV
Calomelanos (ESC)	> -200 mV	-200mV < E_{corr} < -350mV	< -350mV

Figura 10
 Valores límites de potencial de corrosión

A continuación se muestran una serie de imágenes, figura11, ejemplo con los mapas de potencial realizados.

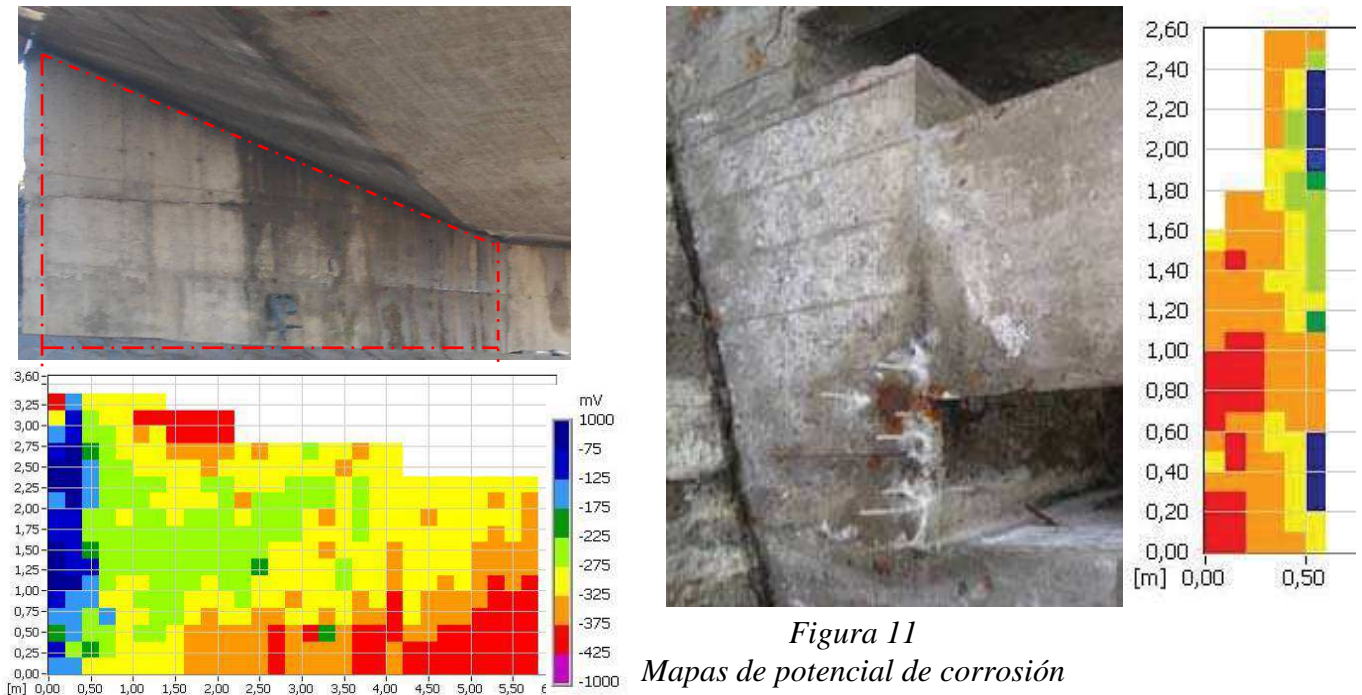


Figura 11
 Mapas de potencial de corrosión

Como se puede ver en los mapas hay zonas con un alto grado de riesgo de corrosión aunque la misma no puede observarse desde el exterior de la estructura.

Destaca sin embargo que en el estudio se encontraron algunos puentes en los que a pesar de encontrarse en zonas de vialidad invernal y con zonas de hormigón deteriorado, las armaduras se encontraban en buen estado tras la inspección visual y el potencial de corrosión no era muy elevado, mostrando la existencia de otros tipos de deterioro del hormigón sin relación con la oxidación de las armaduras, a pesar de la evidente circulación de agua.

4.3 Espesores de recubrimiento y Revelado del perfil de neutralización de la basicidad (medida carbonatación).

Mediante este ensayo se busca determinar la protección de las armaduras frente a la carbonatación del hormigón, se realiza mediante la aplicación de fenolftaleína, siguiendo la norma UNE 112-011-94. Según el color que tome el indicador (incolore para pH inferior a 8, virando a color rojo púrpura a medida que el pH asciende), podemos conocer el avance del frente de carbonatación y si éste ha superado el espesor del recubrimiento.

Este ensayo se realiza in-situ en las catas ejecutadas en la estructura y en los testigos obtenido de los taladros

De los resultados obtenidos en este estudio podemos destacar que el avance del frente de carbonatación en la parte superior de las losas es nulo, en general debido a la protección de la capa de aglomerado, y que los puentes de menor antigüedad y los de nivel-1 con hormigones más compactos tienen un frente de carbonatación mucho menos avanzado que los más antiguos como era de esperar por otra parte.

4.4 Determinación de la resistencia del hormigón

La resistencia del hormigón es uno de los parámetros fundamentales para la caracterización de un hormigón, por eso se ha evaluado mediante dos técnicas complementarias, que permiten una optimización del estudio, ya que por una parte se ha recurrido a ensayos destructivos y precisos, complementándose con otros efectuados in-situ no destructivos, que se han aplicado extensamente. Los ensayos han sido:

- Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de probetas de hormigón, previamente extraídas con sonda rotativa.
- Determinación de la velocidad de ultrasonidos in-situ.

Del análisis de los resultados obtenidos se puede determinar que en las resistencias obtenidas, a pesar de mostrar en algunos casos amplias dispersiones, sus valores medios se encuentran por encima de las resistencias estimadas y requeridas en proyecto. No existen por tanto daños por falta de resistencia, en general, en los puentes analizados.

4.5 Determinación de la compacidad del hormigón.

Este parámetro es uno de los fundamentales para la determinación de la durabilidad del mismo, ya que una buena compacidad bajará la permeabilidad e impedirá la entrada de agresivos desde el exterior.

Para cuantificar la compacidad de los hormigones, en laboratorio se ha determinado la porosidad, densidad y absorción de las distintas probetas extraídas, realizando este ensayo previamente al de rotura a compresión.

En el caso de la porosidad, para calificar la capacidad del hormigón frente a agentes agresivos externos los criterios de valoración más habitualmente empleados son:

- Porosidad $\leq 10\%$: hormigón de buena calidad y compacidad.
- Porosidad entre 10 – 15%: hormigón de moderada calidad.
- Porosidad $> 15\%$: hormigón de durabilidad inadecuada.

En cuanto a los resultados del estudio señalar que la mayor parte de los hormigones son de calidad buena y moderada, aunque cabe destacar que los valores obtenidos son heterogéneos, variando significativamente entre puentes de un mismo tramo de carretera, y sin que se pueda establecer una relación entre la porosidad y la época en la que se construyó el puente, ya que puentes como los situados en la A-67 o la A-23 de construcción más reciente tienen una porosidad más elevada que algunos de los situados en la N-630, más antiguos. Sí es de destacar que en estos últimos, los de la N-630, se aprecia una deficiente ejecución del hormigón de las losas y estribos, con zonas de concentración de grava y poco cemento, o falta de recubrimiento. Las vigas presentan

hormigones de mejor calidad y mejor ejecutadas. Los estribos presentan poca armadura, si bien son muy susceptibles a daños por hielo-deshielo en general.

4.6 Determinación del perfil de cloruros

Este se podría definir como el ensayo más significativo para determinar la afección de los tratamientos de vialidad invernal a los tableros de los puentes, ya que es el aumento de cloruros en el hormigón y la despasivación de las armaduras que genera, el mecanismo de deterioro más habitual.

Dado que los cloruros pueden provenir del exterior (sales fundentes) o estar en la propia masa de hormigón bien por haber sido adicionados en el hormigonado o bien como contaminante de alguno de los componentes, en el ensayo se determina el contenido de cloruros a dos profundidades para poder determinar si los mismos provienen por aportaciones exteriores o no.

En la mayoría de las estructuras se ha tomado como valor limite admisible lo prescrito por la EHE-08.

4.7 Determinación analítica de sulfatos, sodio y potasio.

Además del contenido en cloruros se ha analizado el contenido de otros agentes agresivos para el hormigón como son los sulfatos, que pueden originar un ataque por sulfatos al hormigón y el sodio y potasio donde una alta concentración de los mismos en un hormigón con un árido reactivo puede desencadenar un ataque árido-álcali.

En la mayoría de los puentes el contenido de sulfatos era inferior o al 1,4% respecto peso del hormigón según lo recogido en la norma, salvo una excepción puntual y dos estructuras que contaban con unos valores ligeramente superiores a la norma. En estos casos con unos valores de sulfatos más elevados no se ha encontrado una patología asociada a los mismos.

En cuanto al contenido de álcalis, este es superior al recogido en la norma en varias estructuras, existiendo una posible patología de árido-álcalis en varias de ellas.

4.8 Análisis micro-estructural del hormigón mediante ensayos de microscopía

Los ensayos de microscopía son importantes para confirmar o descartar la degradación del hormigón por la presencia de compuestos expansivos en el mismo, principalmente ettringita o gel de reacción árido-álcalis, aunque pueden aparecer sales expansivas como la sal de Friedel.

Mediante ensayo se puede determinar la composición microestructural del hormigón, así como la existencia o no de microfisuras en el mismo.

De los ensayos realizados en el estudio se ha podido determinar la presencia de ettringita en varias estructuras y reacciones incipientes de árido alcali en varias de ellas también.

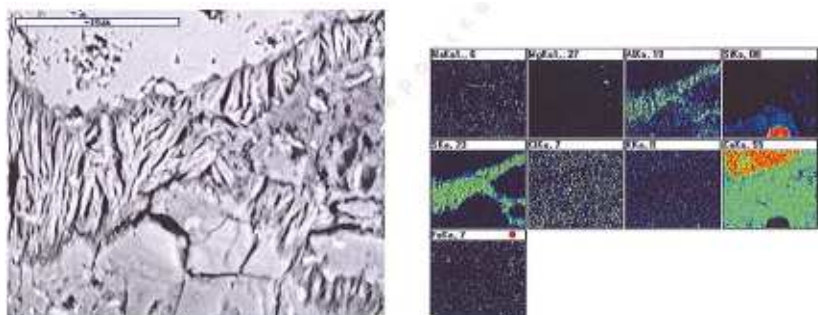


Figura 12
Microscopía: cristalización de ettringita en fisura y mapa de composición elemental

5. ANÁLISIS DE LOS DISTINTOS PUENTES.

Una vez realizadas las inspecciones en los correspondientes puentes y con aplicación de la metodología y ensayos ya indicados, se analizó la problemática de cada uno, y podemos resumidamente destacar lo siguiente:

Se observan distintas zonas de la RCE con niveles de daños asociados.

Una primera zona en la carretera N-630, entre León y la cara sur del puerto de Pajares, a unos 1200 metros de altitud, los temporales entran generalmente desde el Sur hacia Norte, siendo las pendientes de la carretera menores en este tramo, y con oscilaciones térmicas entre -13 y $+11^{\circ}\text{C}$ en algunos meses. En este tramo se localizan 7 estructuras del estudio (en la provincia de León), la **0N-0630-0107+400** sufrió la rotura de la losa del tablero en una zona de unos 1.5 m^2 y fue objeto de reparación integral, otras dos se encuentran muy dañadas en cuanto a su durabilidad, la **0N-0630-101+300** y la **0N-0630-103+830**, otras tres presentan daños parecidos aunque de menor intensidad, **0N-0630-0088+980**, **0N-0630-0090+040**, **0N-0630-091+270** y la **0N-0630-101+050** presenta menor daño, curiosamente no atraviesa cauce de agua, sino la vía del ferrocarril.

Estas estructuras tienen tipologías similares, salvo la del ferrocarril (tipo losa maciza). En general puede apreciarse que los hormigones de las losas superiores del tablero sobre las vigas o nervios son de ejecución poco cuidada (in situ), probablemente con resistencias de unos $22-26\text{ N/mm}^2$, algo superiores a los de los estribos de similar ejecución, 16 N/mm^2 . Estos últimos ejecutados con poca armadura y gran espesor, lo que los hace poco sensibles a corrosión, aunque más expuestos al hielo deshielo. Aparecen zonas con nidos de grava por mala ejecución. En cuanto a los nervios y vigas, estas presentan mayor resistencia y van desde 25 a 36 N/mm^2 , con ejecución más cuidada. El sistema de drenaje de las mismas es casi inexistente, al ser la carretera convencional, se basa en la escorrentía de la propia carretera. La impermeabilización de los tableros también es inexistente, al margen de la capa de firme que ronda los 8 cms . Es importante destacar que los valores de porosidad del hormigón varían entre 8 o 9 en nervios y losa, a 12 en estribos, con cierta homogeneidad.

En este tramo de carretera convencional, se aprecia gran cantidad de cloruros en general en la losa, principalmente en las zonas de borde y en las zonas de juntas, también en los nervios o vigas bajo esta, sobre todo en las de borde y en la viga riostra sobre apoyos en estribos. La abundante presencia de estos cloruros asociadas a zonas con entradas de agua indica que serán probablemente provenientes de los fundentes utilizados durante la vialidad invernal de la carretera.

No se aprecia presencia significativa de sulfatos. En cuanto a la carbonatación, si bien en algunas estructuras es poco trascendente, curiosamente en las dañadas más intensamente (quizás por la gran altura de la estructura sobre el cauce, muy similar en ambas, permite mejor ventilación y alejar el cauce de agua del tablero), en las demás la carbonatación sí es significativa, principalmente en los nervios del tablero resulta ya cercana al valor del recubrimiento de hormigón. La carbonatación de la cara superior de la losa, directamente bajo el firme, es nula en general. La medición del potencial de corrosión y resistividad del hormigón, detecta zonas de riesgo muy elevado asociadas a entradas de agua: zonas de borde, apoyos sobre estribos.

Los daños son similares en todas estas estructuras, y se centran en la existencia de corrosión en zonas localizadas del tablero, circulación de agua, y degradación del hormigón en zonas de borde, alzados y localizada en algunos estribos asociada a ciclos de hielo deshielo, figura13, agudizados por los fundentes empleados en la vialidad. (Para determinar este extremo, la Dirección General de Carreteras está llevando a cabo una investigación en el Instituto Eduardo Torroja basada en la aplicación de los ciclos hielo deshielo con y sin sales, en distintas condiciones, con hormigones de laboratorio con prescripciones similares a los existentes, y contrastados con ensayos en hormigones reales extraídos de algunos de estos puentes. Se pretende analizar la evolución de este daño, y el aumento del mismo que pueden provocar las sales fundentes). Este daño de hielo deshielo, es abundante, si bien no generalizado, y se aprecia en zonas correspondientes a acumulación de nieve, o a determinados alzados (no siempre en el mismo margen de la carretera, a pesar de ser el mismo tramo, asociado al mismo soleamiento y umbría), por lo que debe tener gran influencia el microclima local de cada puente, y su implantación en la carretera.



Figura 13
Daños en muro lateral y en estribo por hielo deshielo

Siguiendo con el resto de puentes, se han estudiado otras 3 estructuras **0A-004-0090+000**, **0A-004-0069+906**, **0A-004-0120+200** (en la provincia de Toledo), situadas en la A-4 entre la provincia de Toledo y Ciudad Real, con amplitud térmica de unos 7°C y temperaturas mínimas de -5 °C. Aquí las precipitaciones son inferiores a la zona anterior y la oscilación térmica menor, -5 a 18. Las tipologías son similares, tablero recto de vigas con losa de compresión. No se localiza sistema de impermeabilización, al margen del firme. La porosidad estimada para dos de estas estructuras se encuentra entre 9 y 12. Se detectó presencia de cloruros importante, mediante puntos de muestreo, en la del PK 120, en las vigas y en los cargaderos de hormigón. Asociado por tanto a zonas de entrada de agua, y por tanto provenientes de fundentes de la vialidad. En las tres, no se detecta presencia de sulfatos. En cuanto al potencial de corrosión, se detecta riesgo elevado en vigas de borde y cargaderos de todas las estructuras.

En general, los principales deterioros se producen por entrada de agua y corrosión en zonas de borde. No se detecta degradación del hormigón.

El puente **0A-0062-0078+460** (en la provincia de Palencia) se localiza en una zona climática de precipitación similar a los anteriores (menor de 600mm de media), oscilación entre -6 y 12 °C, se trata de una losa continua hormigón, de tres vanos y el hormigón de esta presenta resistencias con mucha variación, en zonas de 20 a 22N/mm² y mayores de 40N/mm². La porosidad varía, si bien la media se encuentra en 9%.

No se constata la presencia de cloruros ni de sulfatos. La carbonatación es escasa. El potencial de corrosión determina poca probabilidad, a pesar de detectarse evidentes vías de entrada de agua.

En este caso se realizó análisis de microscopía, que en este caso fue determinante para detectar microfisuración, con cristalización de ettringita y de productos de reacción árido-álcali.

El principal deterioro del puente es la fisuración del tablero tanto en cara inferior y borde de losa. Se encuentra en fase avanzada y con presencia de agua.

El puente **0N-0234-0444+200** (en la provincia de Burgos) se localiza en una zona climática de precipitación mayor de 600mm, con oscilación térmica similar a la anterior, se trata de un puente de 5 vanos, con losa nervada y ampliación a un lado mediante 3 vigas y losa de compresión. La resistencia del hormigón de la zona ampliada es algo superior, en torno a 27N/mm² con porosidad del 8%, frente a 20N/mm² del original con porosidad del 11%.

Se constata la presencia de cloruros en las zonas de borde de losa, en todo el tablero. No se generaliza en los nervios y vigas pero se detectan también en vigas de borde valores sustanciales. No aparecen sulfatos. Y el potencial de corrosión determina probabilidad de corrosión en vigas de borde, siendo baja en los restantes elementos.

Los daños fundamentales van asociados a circulación de agua, con corrosión muy localizada en bordes, cargaderos y juntas.

La estructura **0A-0006-0157+975** (Valladolid), se localiza en zona de precipitación mayor de 600 mm, y oscilación térmica similar a las dos anteriores. Presenta 4 vanos con sección tipo losa continua de hormigón. Las resistencias en el caso los testigos, muestran valores inferiores a lo previsto, probablemente por los daños generalizado de fisuración que todos ellos muestran. Los datos de porosidad mayores del 10% indican que se trata de un hormigón no adecuado para mantener la durabilidad de la estructura.

El avance de la carbonatación es prácticamente nulo en todos los testigos, tanto de losa como de estribos, no teniendo incidencia en posibles problemas de corrosión generalizada. En general, el contenido en cloruros de las muestras es despreciable.

No se destaca presencia de sulfatos de la losa, si bien la concentración de sulfatos detectada en el estribo 2 es claramente elevada, pudiendo ser indicativa de la presencia de ettringita. Por ello se realizó microscopía: En todas las muestras se observa la presencia de ettringita asociada a microfisuración. La acción combinada de este compuesto expansivo con el estado tensional de la estructura, podría ser la causa de las fisuras que se observan. Además, en todas las muestras analizadas se observa la presencia de productos de reacción árido-álcali, aunque esta reacción está en una fase inicial no pareciendo tener incidencia actualmente en la estructura.

Respecto al puente **0N-0502-0055+300** (Avila) se localiza en zona de precipitación elevada (>600mm). La oscilación térmica puede rondar entre -13 y 8°C en algún mes. Constituida por 4 vanos, con 4 vigas con losa de compresión. No se detectan anomalías en el aspecto que muestra el hormigón de la losa, aunque sí se observaron pequeñas precipitaciones blancas de sales en los poros, una vez que ésta se secó. La concentración de cloruros es algo superior a lo prescrito por la EHE. La concentración de sulfatos es algo superior a lo prescrito por la EHE. La carbonatación es nula. El contenido en álcalis supera lo prescrito por la EHE. En el análisis de microscopía se detecta la presencia de ettringita, no asociada a microfisuración.

0N-0502-0042+093 (Avila), situada en la misma zona de precipitación que la anterior y con oscilación térmica similar, formada por 9 vanos, con 6 vigas con losa de compresión, se observan fisuras en la capa superficial de la losa. En los testigos se observan cristalizaciones de sales en poros y pequeños halos rodeando algunos áridos. La carbonatación es nula. Porosidad elevada. La concentración de cloruros elevada. NO se detecta concentración de sulfatos sustancial. El contenido en álcalis supera lo prescrito

por la EHE. Se detectan zonas con elevado riesgo de corrosión, asociadas a circulación de agua en las zonas de borde de tablero. Detección de productos asociados a reacciones árido-álcali aunque en etapa inicial. Presencia de ettringita, no asociada a microfisuración.

0A-0006-0127+076 (Avila), situada en la misma zona de precipitación que la anterior, con menor oscilación térmica, si bien se localiza claramente en una vaguada sobre el río Adaja. Está formada por 5 vanos con sección de 9 vigas con losa de compresión. Los contenidos en cloruro están en el límite o ligeramente por encima de lo prescrito por la EHE. Se han registrado contenidos en sulfatos superiores al límite prescrito por la EHE. En todas las muestras el avance del frente carbonatado es nulo.

En cuanto a los daños, se aprecian manchas de óxido en las alas de las vigas, probablemente por efecto de la escasez de recubrimiento en esas zonas, lo cual favorece la aparición de procesos de corrosión. No se aprecia manifestación de posibles reacciones expansivas.

El puente **0A-0067-0111+300** (en la provincia de Palencia), oscilación entre -6 y 12 °C, se localiza en una zona climática de precipitación menor de 600mm de media. Se trata de tres vanos con sección transversal de 4 vigas con losa de compresión. No se detectan anomalías en el aspecto que muestra el hormigón de la losa, no existiendo síntomas que indiquen procesos degradativos en dicho elemento. La porosidad es elevada. La concentración de cloruros es elevada con respecto a lo prescrito por la EHE. No se detecta concentración de sulfatos sustancial. La carbonatación es nula.

En las estructuras **0A-0023-0104+601**(Teruel) en la **0N-0204-0032+532** (Guadalajara) y en la **0A-0030-0065+536** (Albacete) no se detectan anomalías en el aspecto que muestra el hormigón de la losa de los citados puentes, no existiendo síntomas que indiquen procesos degradativos en sus elementos.

En la siguiente tabla se aporta un esquema de los trabajos realizados en cada puente.

Nº	Codigo	Carretera	PK	Provincia	Porosidad	Degradación del hormigón	Sulfatos	Alcalis
1	0N-0502-0042+093	N-502	42+100	Avila	Elevada	Losa: se observan fisuras en la capa superficial	Concentración inferior al límite EHE	Concentración superior al límite EHE
2	0N-0630-0088+980	N-630	88+890	León		Degradación del hormigón en estribos y muros laterales, con pérdida de varios cm de espesor		
3	0N-0630-0090+040	N-630	90+025	León		Degradación del hormigón en estribos y muros laterales, con pérdida de varios cm de espesor		
4	0N-0630-091+270	N-630	91+100	León		Degradación del hormigón en estribos y muros laterales, con pérdida de varios cm de espesor		
5	0N-0630-101+300	N-630	101+500	León		Degradación del hormigón en estribos y muros laterales, con pérdida de varios cm de espesor	x	
6	0N-0630-103+830	N-630	103+850	León		Degradación del hormigón en estribos y muros laterales, con pérdida de varios cm de espesor		
7	0N-0630-0107+400	N-630	107+890	León	Moderada a alta		Concentración inferior al límite EHE	
8	0A-0067-0111+300	A-67	111+400	Palencia	Elevada	No se detecta degradación en el hormigón de la losa	Concentración inferior al límite EHE	
9	0A-0004-0120+200-I	A-4	120+200	Toledo		Degradación del hormigón principalmente en la cara exterior de las vigas de borde, cargaderos y módulos de impostas Losa: en algunas zonas de la cara superior	Concentración inferior al límite EHE	
10	0N-0630-101+050	N-630	101+100	León		Estribos: en los muros laterales		
11	0A-0004-0090+000-I	A-4	90+000	Toledo		Degradación de los voladizos del tablero		
12	0N-0234-444+200	N-234	445+150	Burgos		El estado de durabilidad es aceptable		
13	0A-0062-0078+460	A-62	78+400	Palencia	Baja		Concentración inferior al límite EHE	
14	0A-0006-0127+076	A-006	127+180	Avila		No se detecta degradación en el hormigón de la losa	Concentración ligeramente superior al límite EHE	Concentración superior al límite EHE
15	0N-0502-0055+300	N-502	55+350	Avila		Losa: no se detecta degradación	Concentración ligeramente superior al límite EHE	Concentración superior al límite EHE
16	0A-006-0157+975	A-6	157+840	Valladolid	Elevada		Losa: inferior al límite EHE Estribo: en el E2 es superior al límite EHE	
17	0A-0004-0069+906	A-4	69+906	Toledo		Tablero: fisuración en malla en los extremos de las vigas		
18	0A-0023-0104+601	A-023	104+750	Teruel		No se detecta degradación		
19	0A-0030-0065+536-I	A-30	65+600	Albacete		No se detecta degradación		
20	0N-0204-0032+532	N-204	32+532	Guadalajara		No se detecta degradación		
21	0A-0042-0071+650+D	A-42	71+500	Toledo		No se detecta degradación		

Nº	Cloruros	Potencial	Carbonatación	Microscopia
1	Losa: concentración superior al límite EHE	Detección de zonas de alto riesgo de corrosión	Nula	Presencia de ettringita y fase incipiente de reacción ácido-álcali
2	Vigas: En todas las vigas en zonas de apoyos y las de borde en su totalidad	Corrosión acusada en las vigas extremas y los apoyos de las vigas restantes		
	Losa: La losa Afectada en toda su extensión y profundidad			
	Estribos: Penetración aproximada de 15 cms			
3	Vigas: En todas las vigas en zonas de apoyos y las de borde en su totalidad	Corrosión acusada en las vigas extremas y los apoyos de las vigas restantes		
	Losa: La losa Afectada en toda su extensión y profundidad			
	Estribos: Penetración aproximada de 15 cms			
4	Vigas: En todas las vigas en zonas de apoyos y las de borde en su totalidad	Corrosión acusada en las vigas extremas y los apoyos de las vigas restantes		
	Losa: La losa Afectada en toda su extensión y profundidad			
	Estribos: Penetración aproximada de 15 cms			
5	Vigas: En todas las vigas en zonas de apoyos y las de borde en su totalidad	Corrosión acusada en las vigas extremas y los apoyos de las vigas restantes		
	Losa: La losa Afectada en toda su extensión y profundidad			
	Estribos: Penetración aproximada de 15 cms			
6	Vigas: En todas las vigas en zonas de apoyos y las de borde en su totalidad	Corrosión acusada en las vigas extremas y los apoyos de las vigas restantes		
	Losa: La losa Afectada en toda su extensión y profundidad			
	Estribos: Penetración aproximada de 15 cms			
7	Concentración superior al límite EHE			Presencia de ettringita
8	Concentración superior al límite EHE		Nula	
9	Cargaderos: concentración superior al límite EHE		Excepto zonas localizadas, la carbonatación existente no afecta a las armaduras	
	Pilas: concentración superior al límite EHE en pilas de borde			
10	Losa: especialmente en zonas de recubrimientos deficientes	corrosion acusada en la losa.	Existente	
11	Contenido despreciable	Corrosión activa en las vigas exteriores	Los recubrimientos son ligeramente mayores que los espesores carbonatados	
	Vigas: en algunas de las vigas de borde			
12	Aceras			
13	Contenido despreciable		Escasa o nula	Presencia de ettringita y fase incipiente de reacción
14	Concentración ligeramente superior al límite EHE		Nula	
15	Losa: concentración ligeramente superior al límite EHE		Nula	Presencia de ettringita no asociada a microfisuración
16	Contenido despreciable		Escasa o nula	Presencia de ettringita y fase incipiente de reacción
17	Vigas: contenido despreciable	Estado pasivo de corrosión	Existente pero no afecta a las armaduras	
18				
19				
20				
21				

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez realizado este estudio centrado en la durabilidad del tablero en puentes de hormigón situados en la RCE podemos señalar las siguientes conclusiones:

- En 8 estructuras (la 11,13,16,17,18,19,20,21) no se detecta presencia significativa de cloruros sobre todo en las losas de tablero. En las demás estructuras sí se han detectado cloruros, fundamentalmente en las zonas de entrada de agua: bordes de losa, vigas de borde, cargaderos y estribos. En algunos puentes, como en la N-630, de climatología muy adversa, con daños de gran intensidad. Esto hace pensar que van ligados a la entrada de agua desde la carretera conteniendo sales, asociadas a la vialidad invernal. Pueden producirse distintos tipos de daños relacionados:
 - Uno la corrosión de las armaduras: en general no se ha detectado aumento significativo de la corrosión por este motivo. En todos los casos la carbonatación de la losa, sobre todo su cara superior, es nula lo que por una parte se puede deber a la protección que ejerce como barrera física el firme, dada la deficiente impermeabilización de los puentes estudiados.
 - Otro tipo puede ser, el aumento de la degradación del hormigón del tablero, o de los estribos. Se han observado deterioros claros debidos al hielo-deshielo, descascarillados de varios centímetros, ligados a zonas de entrada de agua junto a

zonas del mismo puente muy cercanas, sometidas por tanto a las mismas temperaturas y condiciones, sin deterioro apreciable. También se asocia a zonas de mayor acumulación de nieve y/ o sal. El efecto de las sales seguramente acelere el proceso degradativo de forma evidente, aspecto éste que se está investigando por técnicos de la Dirección General de Carreteras.

- Finalmente otro tercer aspecto como es el de los compuestos que pueden formarse por la inclusión de estos cloruros en el hormigón deteriorado, para ello se han realizado también análisis de microscopía, si bien no se han encontrado de forma clara nuevos compuestos originados, aunque se tratará de avanzar más en este fenómeno.
- También se han detectado contenidos en álcalis elevados en algunos de estos casos, lo que se puede deber por una parte al contenido original del cemento empleado y por otra a la adición de sodio, en forma de sal fundente (NaCl).
- En las estructuras 13 y 16 se observa de forma acusada abundante fisuración en el tablero, que podría deberse a un problema intrínseco de la composición del propio hormigón, con formación de ettringita y compuestos de árido-álcalis. Los cloruros en este caso no se han detectado.
- Finalmente se ha validado la metodología propuesta, y se propone su aplicación en más casos, de modo que puedan compararse los daños y problemas asociados a la durabilidad de estructuras de hormigón en zonas de climatología adversa, así como analizar la incidencia de los fundentes.

Así mismo se plantea acotar unas zonas climáticas con intensa vialidad invernal, y condiciones de temperatura y humedad adecuadas para que se produzcan daños críticos por hielo-deshielo. En este sentido la carretera N-630 se confirma como un tramo posible de estudio en detalle. En estas zonas se debería prestar especial atención a los sistemas de drenaje e impermeabilización.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- UNE122083, Medición del potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado. UNE-EN 14630:2007. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenoftaleína. UNE-EN 12390-3. Determinación de la resistencia a compresión.
- EHE-08. Instrucción del hormigón estructural. Ministerio de Fomento. 2008.
- ACI Committee 201. (2000). 201.2R-01: Guide to durable concrete. American Concrete Institute.
- Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado. Ministerio de fomento. Secretaría General de Infraestructuras. 2012.
- Conservación de aparatos de apoyo, juntas y drenaje en puentes. Asociación técnica de carreteras, Asociación científica técnica del hormigón estructural, ATC-ACHE, Madrid. 2011.
- Durabilidad de estructuras de hormigón. Boletín nº 12, GEHO. 1993