

CAUSAS DE DETERIORO DE LA LOSA DE TABLERO DE UN PUENTE UBICADO EN LA RN N° 3, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Juan Cruz Montero¹, Juan José Berezosky^{1,2}, Paula Pérez Marfil^{2,3}, Darío Falcone⁴,
Francisco Locati⁵, Silvina Marfil^{2,3}

¹ Dirección Nacional de Vialidad 19° Distrito, Bahía Blanca. jmontero@vialidad.gob.ar;
jberezosky@vialidad.gob.ar

² Departamento de Geología UNS, Bahía Blanca. paulaperezmarfil@gmail.com,
smarfil@uns.edu.ar

³ CGAMA-CIC de la provincia de Buenos Aires.

⁴ LEMIT-CIC, La Plata. durabilidad@lemit.gov.ar

⁵ CICTERRA (CONICET-UNC), Córdoba. flocati@unc.edu.ar

RESUMEN

Se estudió la losa de tablero de un puente ubicado sobre la RN N° 3 (provincia de Buenos Aires), con evidencias de fisuramiento. Se extrajeron 16 testigos y se midió el espesor de la losa y recubrimientos, densidad, absorción, profundidad de carbonatación y resistencia a compresión. Además, se realizaron estudios petrográficos y se determinó el contenido de álcalis en el hormigón. Finalmente, se calculó el índice de daño (*Damage Rating Index*). Los resultados muestran problemas constructivos (espesores de losa y recubrimientos deficientes) y un empobrecimiento de la calidad del hormigón (carbonatación y fisuración de la pasta de cemento). Sin embargo, los valores de resistencia obtenidos son satisfactorios. Si bien los agregados gruesos utilizados son potencialmente reactivos, el bajo contenido de álcalis solubles en el hormigón habría favorecido a que no se desarrollen reacciones deletéreas. El deterioro de la estructura se habría producido por sobrecarga en zonas puntuales del puente.

Palabras claves: losa, hormigón, puente, durabilidad

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se analizan las posibles causas de deterioro de la losa de tablero de un puente ubicado sobre la RN N° 3, provincia de Buenos Aires (Figura 1a). Según los planos de la estructura objeto de estudio, se asume que se construyó durante el año 1983 y se encuentra en servicio desde el año 1984 [1]. Es un puente categoría A-30, por lo que el espesor de la losa de tablero debe ser 14 cm, con un recubrimiento de 1,5 cm y la resistencia mínima a compresión debe ser mayor a 210 kg/cm² [2].

En el mes de junio del año 2017 la Dirección Nacional de Vialidad informó sobre una falla local en la losa de tablero lo que provocó que se genere un hueco de 71,5x80,5 cm en uno de los tramos (Figura 1b). El mismo fue reparado y posteriormente (en el mes de noviembre) se reiteró la falla, de similares características, en un sector contiguo a la reparación (Figura 1b). En julio de 2019 la misma Repartición, encontró un bache abierto en uno de los derivadores del puente, similar a lo sucedido en el año 2017, pero en esta

ocasión en la estructura principal (Figura 1b). Para un análisis más completo y minucioso de la situación, en el año 2019, se extrajeron 16 testigos de hormigón de toda el área deteriorada, con el fin de establecer las causas de la falla y brindar información para una posible solución.



Figura 1: Puente sobre la RN N° 3. a) Vista panorámica del puente (imagen de Google Earth). b) Fallas en la losa de tablero en el puente principal y en un derivador.

En el presente trabajo se presentan los principales resultados obtenidos a partir del estudio mencionado, complementados con análisis químicos para determinar el contenido de álcalis en el hormigón y petrográficos para aportar información sobre la microestructura del hormigón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se extrajeron 16 testigos de hormigón en los sectores deteriorados de la losa de tablero (Figura 2a) del puente ubicado en el Km 28,86 de la RN N° 3 (provincia de Buenos Aires). Se estima que la estructura tiene una edad de 36 años y está especificado como categoría A-30.

El calado de testigos se realizó según lo indicado en la norma IRAM 1551 [3]. Para realizar la extracción se utilizó un equipo CARDI, montado sobre una columna soporte y una bomba de vacío. Se utilizó una broca diamantada de 72 mm de diámetro.

Sobre los testigos calados se realizaron ensayos de resistencia a compresión según IRAM 1546 [4]. Se utilizó una prensa hidráulica digital marca CONTROLS (1500 kN), del laboratorio del Distrito 19 de Vialidad Nacional.

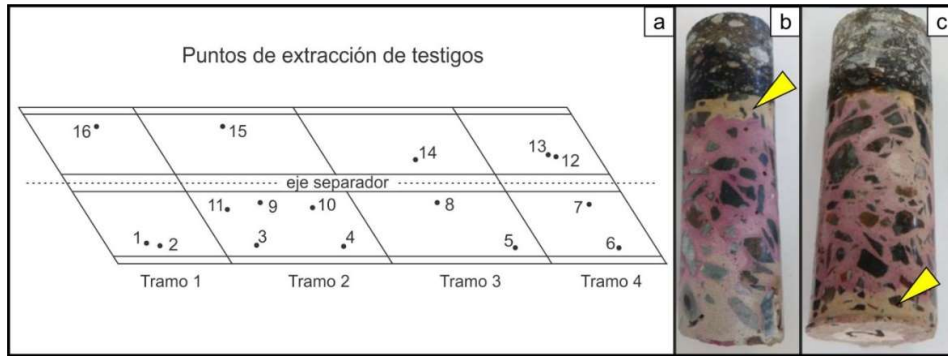


Figura 2: a) Localización de los testigos de hormigón extraídos del puente. b) Testigo 16 donde se puede apreciar el espesor carbonatado (flecha) de la losa de tablero, por debajo de la carpeta de rodamiento. c) Testigo 2 con carbonatación en el sector inferior de la losa de tablero (flecha).

La determinación de la densidad se realizó según la norma UNE-EN 12390-7 [5].

La determinación de la profundidad de carbonatación se realizó según lo indicado en la norma UNE-EN 14630 [6]. Se utilizó una solución con fenolftaleína, alcohol y agua destilada en la proporción indicada en la norma. Se rociaron los testigos con la solución y luego se midió el espesor de carbonatación.

De forma complementaria, se determinó el contenido de álcalis solubles en el hormigón siguiendo los lineamientos del método de extracción por lixiviación con agua caliente, propuesto por Bérubé *et al.* [7]. Las determinaciones se realizaron sobre 3 testigos pertenecientes a los tramos identificados como 2, 3 y 4 en la Figura 2a. Se tomó 10 gr ($\pm 0,0010$) de muestra (hormigón triturado $< 0,150$ mm) a la que se adicionó 100 mL de agua destilada, se llevó a ebullición durante 10 min y se dejó reposar durante 24 hs. Luego se filtró con filtros rápidos cualitativos y se conservaron las soluciones en frascos de plástico. A las soluciones resultantes de los ensayos, de aproximadamente 100 mL, se le adicionaron 20 mL de ácido clorhídrico al 50 % (1+1) y 20 mL de ácido fosfórico al 50 % (1+1). Luego se llevaron a un volumen de 200 mL con matraz aforado y se procedió a realizar las determinaciones de Na^+ y K^+ por espectrofotometría de llama. Los resultados se expresan en $\text{kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ de hormigón. El método determina el contenido de álcalis solubles en agua que aportan todos los componentes del hormigón.

Finalmente, se realizaron estudios petrográficos sobre secciones delgadas mediante un microscopio óptico de polarización Leica DM 750P, y se estimó el nivel de daño de 5 testigos de hormigón mediante la determinación del *Damage Rating Index* (DRI) [8] utilizando un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT. El DRI es un método semicuantitativo que sirve para estimar el nivel de daño del hormigón a partir del conteo de determinadas características de deterioro (principalmente fisuras) en cuadrados de 1 cm x 1 cm dibujados sobre la superficie del hormigón pulido, trabajando bajo estereomicroscopio a una magnificación de 16x. Cada característica luego es afectada por un factor de ponderación a fin de balancear su importancia relativa (y minimizar la variabilidad entre operadores) y así obtener una puntuación de daño general. Se sugiere trabajar con una grilla mínima de 200 cm^2 . El resultado es luego normalizado a 100 cm^2 , obteniéndose un único valor para el DRI. En los testigos analizados, su tamaño solo permitió trabajar con grillas de 42 cm^2 a 60 cm^2 , por lo que el área analizada es menor a lo sugerido en el método. A fin de contar con datos adicionales que permitan un mejor análisis de la microestructura del hormigón, se decidió determinar los valores de DRI a partir de las áreas disponibles (normalizando a 100 cm^2). Se registraron tanto las características que afectan a los agregados gruesos como finos en conjunto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición de espesores

En la Tabla 1 se muestran los espesores obtenidos a partir del calado de testigos de 7,0 cm diámetro. Se midieron espesores en la losa de tablero, las losetas, las carpetas de rodamiento y el espesor de recubrimiento en aquellos testigos en los que se había alcanzado alguna armadura. En la tabla se expresan en rojo aquellos valores que no verifican el espesor de las losas de tablero o el recubrimiento requerido en el proyecto.

Tabla 1: Espesores medidos en los testigos de hormigón. H: espesor total del testigo de hormigón. C: espesor de la carpeta de rodamiento. LT: espesor de la losa de tablero. LS: espesor de la pre-losa. H1 y H2: espesores de recubrimientos superior e inferior de las armaduras, respectivamente.

Testigo	H (cm)	C (cm)	LT (cm)	LS (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Tramo
1	18,4	6,0	12,4	-	-	-	1
2	18,5	6,0	12,5	-	-	-	1
3	22,0	7,0	15,0	-	-	-	2
4	24,0	6,5	14,5	3,0	-	2,5	2
5	21,0	6,8	14,2	-	1,1	0,2	3
6	20,0	7,0	13,0	-	1,0	1,2	4
7	21,8	5,8	13,0	3,0	1,8	-	4
8	22,0	6,0	13,0	3,0	-	0,5	3
9	25,0	5,5	16,5	3,0	2,0	4,3	2
10	19,5	7,0	12,5	-	2,0	-	2
11	20,0	6,5	13,5	-	2,0	-	2
12	-	5,0	-	-	-	-	4
13	21,8	5,5	13,6	2,7	-	2,0	4
14	16,7	5,0	11,7	-	-	2,5	3
15	23,0	7,0	14,0	2,0	3,5	-	2
16	20,0	5,5	15,5	-	3,0	-	1
Promedio	-	6,2	13,7	2,8	2,1	1,9	-

Ensayo de carbonatación

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de carbonatación con fenolftaleína. Se aprecia que la carbonatación de la cara superior de la losa de tablero posee un espesor promedio de 1,15 cm (Figura 2b). En algunos testigos se observó dicho fenómeno en la parte inferior de la misma (Figura 2c), probablemente por la falta de adherencia de la losa de tablero con las pre-losas utilizadas para el encofrado, lo que permitió el ingreso de CO₂ en ese sector de la estructura. Sin embargo, parece ser un fenómeno localizado ya que solo 3 testigos lo evidenciaron.

Tabla 2: Profundidad de carbonatación de testigos de hormigón.

Testigo N°	Tramo	Carbonatación superior (cm)	Carbonatación inferior (cm)
2	1	0,0	1,3
4	2	1,1	0,0
5	3	1,0	0,0
6	4	1,4	0,0
8	3	1,0	2,5
10	2	1,1	0,0
13	4	1,2	2,1
15	2	1,0	0,0
16	1	1,4	0,0

Ensayo de densidad y absorción

Los valores de densidad de las muestras en condición Saturada a Superficie Seca (sss) y absorción (Tabla 3), son valores razonables para hormigones convencionales con agregados del tipo graníticos (con excepción del testigo 13 cuyo valor es superior para la densidad y bajo en el caso de la absorción). La absorción es un indicador de la porosidad, que es un factor clave para obtener hormigones durables. El promedio de densidad de todos los testigos analizados restantes es de 2380 kg/m³.

Tabla 3: Valores densidad en condición sss y absorción de testigos de hormigón.

Testigo N°	D sss (kg/m ³)	Absorción (%)
1	2384	4,9
5	2449	4,9
7	2374	5,0
10	2394	5,2
13	2491	1,8
14	2370	6,4
15	2327	5,7
16	2362	4,8

Ensayo de compresión

En la Tabla 4 se muestran las dimensiones de cada testigo y la resistencia lograda. A partir de estos resultados se aplican las correcciones por esbeltez según lo establecido en la Tabla 1 de la norma IRAM 1551 [3]. No se muestran los resultados de los testigos que no cumplen con las especificaciones de las normas IRAM 1551 [3].

Tabla 4: Resistencia a compresión de testigos de hormigón.

Testigo N°	Diámetro (d) promedio (mm)	Altura (a) promedio (mm)	a/d	Resistencia corregida por esbeltez (kg/cm ²)
2	642	972	1,51	229
3	641	641	1,00	344
4	641	854	1,33	223
5	641	1188	1,85	354
6	640	1042	1,63	390
7	641	1196	1,87	221
8	641	893	1,39	239
9	641	805	1,26	300
10	642	759	1,18	321
11	641	1055	1,65	310
13	638	652	1,00	223
14	641	1105	1,70	232
15	641	983	1,50	263

Contenido de álcalis en el hormigón

En la Tabla 5 se indican los resultados de álcalis solubles obtenidos. Los valores son bajos. Esto podría estar ligado a la carbonatación parcial del mortero [9] como pudo constatarse a través del ensayo de carbonatación y por petrografía. Además, la concentración de álcalis de la solución de poro del hormigón disminuye con el tiempo, considerándose que, en el orden del 60% del total de álcalis del cemento (soluble en ácido) estará disponible y el 40% restante queda atrapado por los productos de hidratación [10].

Tabla 5: Contenido de álcalis solubles en el hormigón.

Testigo N°	Tramo	RAS	Álcalis solubles en agua (kg Na ₂ Oeq/m ³)
5	3	No	0,5
6	4	No	0,9
15	2	No	0,5

Petrografía

El agregado grueso está constituido por rocas de textura milonítica (75 %) y rocas de textura gnéissica (25 %). Las milonitas están compuestas por grandes porfiroclastos de feldespato potásico (~ 10–30 mm, levemente caolinizados) y porfiroclastos de menor tamaño (< 1 mm) de feldespato potásico, plagioclasa (levemente alterada a caolinita y sericita), cuarzo, hornblenda y titanita, en una matriz recristalizada de grano fino (por sectores con marcada orientación) de cuarzo, feldespatos y biotita (Figura 3a). De forma minoritaria se reconoció epidoto, granate y óxidos/hidróxidos de hierro. Se identificó ~ 16 % de cuarzo microcristalino < 62 µm en la mezcla de agregados, por encima del 5 % establecido como límite en la norma IRAM 1531 [11] para considerar al agregado como potencialmente reactivo.

El agregado fino es una arena natural compuesta por granos de cuarzo (65 %), areniscas silíceas (10 %), fragmentos de rocas graníticas, (10 %), feldespatos (10 %), y muy escasa cantidad de calcedonia, fragmentos de rocas alteradas, carbonatadas y argilizadas (< 5 %). Es común observar óxidos de hierro que tiñen la superficie de las partículas.

El mortero presenta cavidades de aire accidental en su mayoría vacías. En las proximidades de la armadura se observa microfisuramiento aunque no hay evidencias de procesos de oxidación. La textura del hormigón es homogénea con algunas microfisuras subhorizontales vacías más desarrolladas en la superficie expuesta. Estas desaparecen o disminuyen su apertura con la profundidad. Por lo general las microfisuras afectan la pasta de cemento y solo se vinculan con los agregados finos y gruesos a través de su interfase (Figura 3b). El contacto entre la pasta y los agregados es neto (Figura 3a) a excepción de algunos sectores donde el contacto pasta-agregado fino se hace más transicional. Sin embargo, en ninguno de los casos se reconocieron evidencias del desarrollo de productos de neoformación asociados con la reacción álcali- sílice (RAS). El mortero se presenta muy carbonatado, en especial en los tramos superior e inferior de la losa de tablero.

DRI

En la Figura 3c se muestra un sector de uno de los testigos analizados. Se puede ver la cuadrícula dibujada en la superficie del testigo de hormigón y se marcan alguna de las características cuantificadas. En la Figura 3d se muestran los resultados obtenidos sobre los 5 testigos estudiados. Con fines prácticos, se mantuvieron las siglas en inglés correspondientes a cada característica, tomadas del trabajo de Sanchez *et al.* [8], si bien como se mencionó anteriormente las mismas fueron registradas tanto para agregados gruesos como finos y tratadas en conjunto.

Independientemente de los valores finales de DRI obtenidos, se puede ver que las fisuras en los testigos más deteriorados se concentran en la pasta de cemento y en segunda instancia comienzan a afectar las fisuras dentro de los agregados. Por la ley del menor esfuerzo, es más fácil continuar abriendo fisuras previas que generar nuevas en el interior del agregado (de mayor resistencia que la pasta). Además, casi no se observan evidencias de productos de reacción asociados a fisuras en el interior de los agregados o la pasta de

cemento. Esto confirma el no desarrollo de la RAS, probablemente por los bajos contenidos de álcalis solubles en la solución de poro.

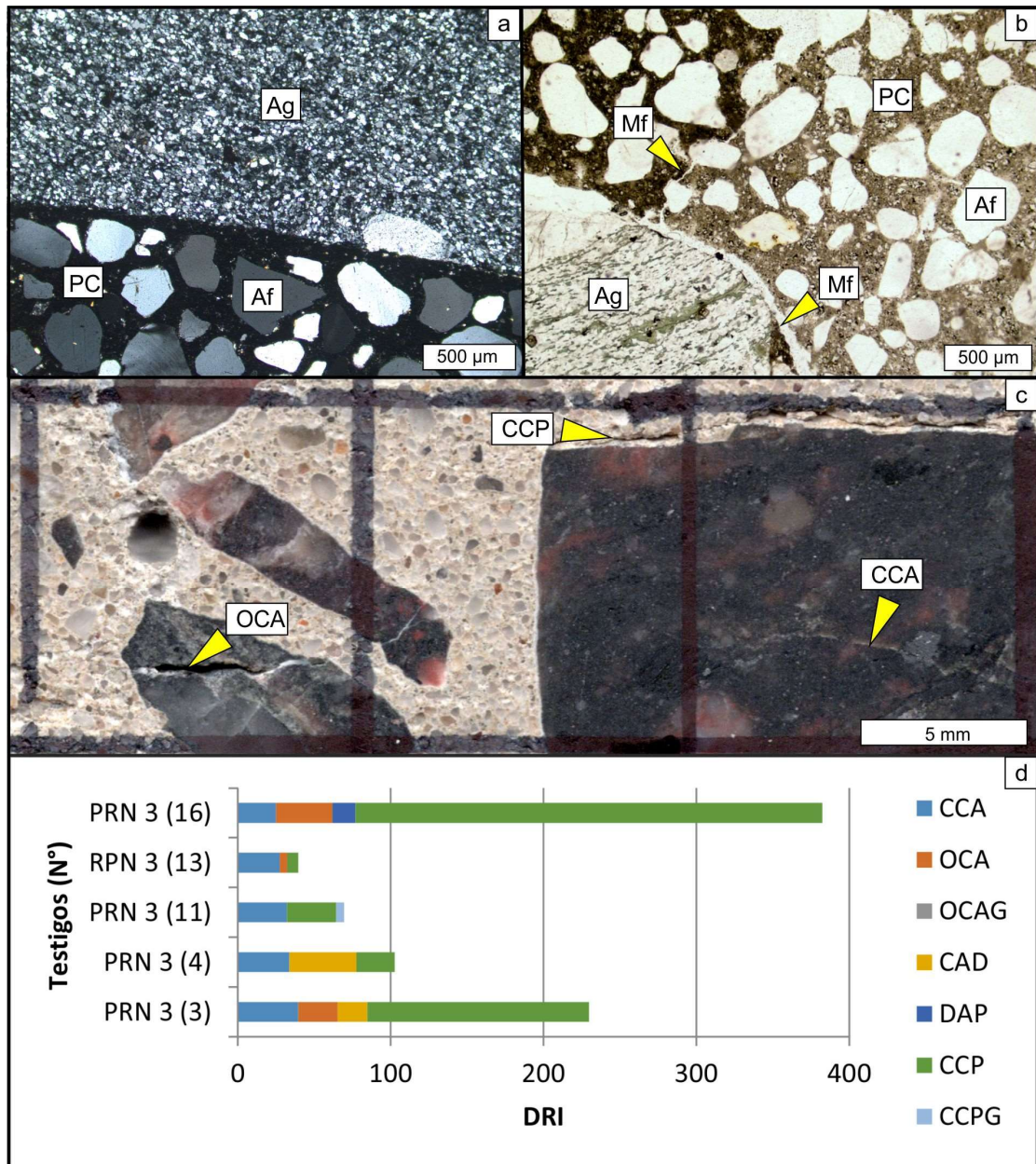


Figura 3. a) Contacto neto entre el agregado grueso milonítico y la pasta de cemento (fotomicrografía con nicoles cruzados). **b)** Microfisura que afecta la pasta y la interfase con los agregados finos y grueso (fotomicrografía con nicoles paralelos). **c)** Sector de uno de los testigos estudiados para determinar el DRI (con estereomicroscopio). **d)** Resultados del DRI sobre los 5 testigos estudiados. Ag: agregado grueso. Af: agregado fino. PC: pasta de cemento. Mf: microfisura. CCA: fisura en el agregado grueso. OCA: fisura abierta en el agregado grueso. OCAG: fisura con producto de reacción en el agregado grueso. CAD: agregado grueso desprendido. DAP: partícula de agregado corroída o desagregada. CCP: fisura en pasta de cemento. CCPG: fisura con producto de reacción en pasta de cemento.

CONCLUSIONES

- El 50 % de los testigos calados en la losa de tablero no cumple con el espesor establecido por proyecto (14 cm).
- De los doce testigos que tenían hierros de la armadura en solo tres la losa de tablero estaba adherida a las pre-losas.
- La profundidad de carbonatación es de 11,5 mm (1,15 cm) y no alcanza las armaduras.
- Los valores de densidad son valores esperables para un hormigón convencional con agregados de tipo granítico al igual que la absorción, del orden del 5 %, para hormigones con el nivel de resistencia obtenidos.
- Todos los testigos ensayados tienen una resistencia a compresión efectiva superior a 210 kg/cm². Sin embargo, se observó alta dispersión en los valores obtenidos lo que sugiere falta de homogeneidad del material.
- Según los estudios petrográficos, no se observan evidencias del desarrollo de reacciones deletéreas tipo RAS, aunque el agregado grueso es potencialmente reactivo debido al elevado contenido de cuarzo microcristalino (< 62 µm). Esto podría deberse al bajo contenido de álcalis solubles en el hormigón.
- Los resultados del DRI, muestran que la fisuración afecta principalmente a la pasta de cemento, en especial en aquellos sectores de mayor deterioro.
- Los estudios realizados adjudican el deterioro a problemas constructivos (espesor de la losa y del recubrimiento deficiente) y a la sobrecarga generada en zonas puntuales del puente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a VN Distrito 19, al CGAMA, a la CIC (Bs. As.), al Dpto. de Geología de la UNS, al LEMIT y al CICTERRA (CONICET-UNC) por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] Dirección Nacional de Vialidad, "Informe de Auscultación. Puente R.N. N° 3 km 28,86 s/ RP 21 y FFCC Belgrano", DNV 1° Distrito - Región Centro, Sección Sigma, (2019), 21 p.
- [2] "Bases para el cálculo de puentes de hormigón armado", Dirección Nacional de Vialidad (2001), 51 p.
- [3] IRAM 1551, "Hormigón de cemento pórtland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido", (2000), 12 p.
- [4] IRAM 1546, "Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión", (2013), 13 p.
- [5] UNE-EN 12390-7, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido", Asociación española de Normalización y Certificación, (2019), 13 p.
- [6] UNE-EN 14630, "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 fenolftaleína", Asociación española de Normalización y Certificación, (2007), 9 p.
- [7] Bérubé MA, Frenette J, Rivest M, Vézina D, "Measurement of the Alkali Content of Concrete Using Hot-Water Extraction", Cem Concr Aggr, Vol. 24, N° 1, (2002), 28-36.
- [8] Sanchez LFM, Fournier B, Jolin M, Duchesn, J, "Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI)", Cem Concr Res, Vol. 67, (2015), 74-92.
- [9] De Weerd K, Plusquellec G, Belda Revert A, Geiker MR, Lothenbach B, "Effect of carbonation on the pore solution of mortar", Cem Concr Res, Vol. 118, (2019,) 38-56.
- [10] Milanesi C, Souza E, Marfil S, Maiza P, "Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra", III Congreso Internacional - 17ª Reunión Técnica de la Asociación. Argentina de Tecnología del Hormigón, (2008), 273-280.
- [11] IRAM 1531, "Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo", (2016), 33 p.