



CONSIDERACIONES ACERCA DEL ESTADO DEL HORMIGÓN DEL PAVIMENTO DE LA RUTA NACIONAL 24 (URUGUAY) LUEGO DE DIEZ AÑOS EN SERVICIO AL TRÁNSITO

MILANESI, Carlos A.¹, PAPPALARDI, Mariano¹, MARFIL, Silvina², LOCATI, Francisco³,
GIACCIO, Graciela M.⁴, ZERBINO, Raúl L.⁵, FONTANS, David⁶, PEREYRA, María N.⁷,
VILA, Patricia⁷

¹ Cementos Avellaneda S. A., Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina,
cam@cavellaneda.com.ar; mp@cavellaneda.com.ar

² Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur - CGAMA-CIC, Bahía Blanca,
Argentina, smarfil@uns.edu.ar

³ CICTERRA (CONICET-UNC) – Ingeniería Civil - UCC, Córdoba, Argentina, flocati@unc.edu.ar

⁴ CIC-LEMIT, Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina, ggiaccio@ing.unlp.edu.ar

⁵ CONICET, CIC-LEMIT, Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina,
zerbino@ing.unlp.edu.ar

⁶ Grinor S.A., Montevideo, Uruguay, davidfontans@grinor.com.uy

⁷ Departamento de Construcción, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería
Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, mpereyra@fing.edu.uy; pvila@fing.edu.uy

RESUMEN

En el año 2011 se inicia la rehabilitación de un tramo de la Ruta Nacional 24 (Uruguay), con la construcción de un pavimento de hormigón delgado, reforzado con fibras. A raíz de la presencia generalizada de fisuras en las losas, similares a las de la reacción álcali-sílice (RAS), se decide analizar sus posibles causas mediante el estudio de testigos extraídos del pavimento. El grado de deterioro del hormigón se valoró mediante diversos índices, calculados a partir de las curvas tensión-deformación del hormigón, bajo ciclos de carga y descarga. La existencia de fenómenos asociados a la RAS y sus posibles efectos deletéreos se evaluó mediante el examen petrográfico del hormigón y la determinación del índice de daño. Si bien, se identificaron minerales potencialmente reactivos, la presencia de signos de RAS es escasa y localizada. A partir de la información disponible se analizan las posibles causas del deterioro del hormigón.

Palabras clave: Reacción álcali-sílice, índice de daño, fatiga, whitetopping

INTRODUCCIÓN

La Ruta Nacional (RN) 24 se sitúa en la región oeste de Uruguay, enlazando las RN 2 y 3, desde las cercanías de Fray Bentos a Paysandú. En los años 90', a partir de la promulgación de la Ley N° 15.939 que promovió la actividad forestal (Figura 1a), comenzó a producirse un incremento del tránsito pesado, que motivó, durante los años 1999 y 2000, la necesidad de llevar a cabo la rehabilitación de la ruta, mediante la conformación de un importante paquete estructural, con 45 cm de material granular (base y subbases) más 15 cm de concreto asfáltico.

Durante 10 años de servicio al tránsito pesado, el pavimento flexible se fue ahuellando de manera significativa, pero fue esencial el espesor remanente de la capa asfáltica para poder aplicar un novedoso método de diseño, en una nueva rehabilitación de la ruta, mediante la ejecución de un whitetopping adherido [1]. Dicho proyecto, presentó el desafío adicional de contemplar un hormigón reforzado con macrofibras sintéticas (HRF), aplicado con tecnología de alto rendimiento [2]. De esta manera se construyó entre los meses de agosto de 2011 y marzo 2012 un primer tramo de la RN 24 de 21,6 km de longitud, desde su empalme con la RN 2 (Progresiva 0+000) hasta el empalme con la ruta 20 (Progresiva 21+600) del acceso a Nuevo Berlín.

Los requisitos establecidos para el HRF en el Pliego de Especificaciones Técnicas Particulares de la obra fueron: resistencia a compresión 35 MPa; módulo de rotura 5 MPa; y resistencia residual (f^D_{150}) 1 MPa (20 % del MR), todos ellos valores medios a la edad de 28 días; asentamiento a 30 minutos de 2,0 a 3,0 cm y aire incorporado igual a 2,0 %. La Tabla 1 muestra la dosificación propuesta para cumplir estos requisitos, considerando los ajustes realizados por razones de estacionalidad. Las principales propiedades valoradas en el hormigón, durante el desarrollo de este tramo de la obra, se indican en la Tabla 2.

De los datos de un relevamiento reciente [3], surge que el estado actual de servicio del pavimento, en el tramo considerado, es muy satisfactorio, a pesar de haber transcurrido más del 80 % de la vida útil prevista en el diseño. A pesar de lo expuesto, a raíz de la presencia de un cuadro de fisuración generalizado en las losas, similar al que produce la RAS (Figura 1b), se decidió analizar las posibles causas de estas fisuras mediante el estudio de testigos de hormigón extraídos del pavimento.

Tabla 1: Dosificación correspondiente al HRF para la rehabilitación de la Ruta 24.

Materiales componentes	Contenidos (kg/m ³)
Cemento CPN40, a granel	340 a 365
Agua	140 a 150
Arena natural fina (Río Negro) MF = 1,80 (*)	235 a 200
Arena natural gruesa (Río Negro) MF = 3,20 (*)	570 a 550
Piedra partida 5-20 granítica (*)	575 a 570
Piedra partida 20-30 granítica (*)	575 a 570
Aditivo superfluidificante	2,05 a 2,20
Macrofibra sintética	2,7 a 2,5
Microfibra sintética	0,6
Relación agua/cemento	0,41

(*) Las cantidades se expresan en condición saturada y superficie seca

Tabla 2: Propiedades evaluadas en el HRF durante la construcción del Tramo I (RN24).

Propiedades	Valor medio	Desvío	Valor máximo	Valor mínimo
Asentamiento (cm)	3,2	0,5	4,0	2,0
Capacidad de exudación (%)	1,4	0,9	2,5	0,3
Contenido de macrofibras (%)	2,63	0,03	2,69	2,60
Resistencia a compresión (MPa) Probetas ¹⁾	38,3	3,3	44,7	27,3
Testigos ²⁾	37,6	4,7	51,3	26,2
Módulo de rotura (MPa)	5,6	0,3	6,4	5,1
Resistencia residual (f^D_{150}) (MPa)	1,2	0,2	1,6	0,9
Adherencia HRF-Asfalto (corte) (MPa)	1,3	0,2	1,6	1,1

1) Diámetro de las probetas = 15 cm; 2) Diámetro de los testigos = 10 cm.

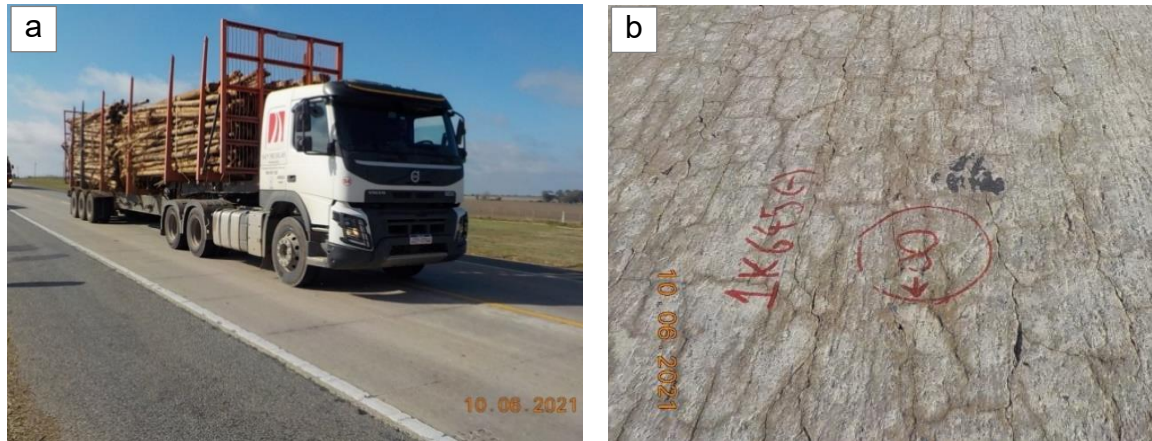


Figura 1: a) Vista de los vehículos típicos que transitan la RN 24; b) Aspecto del patrón de fisuras existente en la superficie del pavimento.

La valoración del grado de deterioro del hormigón se realizó mediante ensayos de compresión donde se determinaron las curvas tensión-deformación, realizando ciclos de carga y descarga, y a partir de ellas diversos parámetros mecánicos (índice de daño de la rigidez, SDI; índice de deformación plástica, PDI; índice de no linealidad, NLI). Para comprobar la existencia de fenómenos asociados a la RAS, se procedió al examen petrográfico del hormigón con estereomicroscopio y microscopía óptica de polarización sobre secciones delgadas.

En lo que sigue, se resumen los resultados obtenidos a partir de la respuesta mecánica y de la observación de defectos a nivel meso y microestructural y se analizan las posibles causas del deterioro observado en el hormigón del pavimento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

En junio de 2021 se extrajeron testigos de hormigón de dos zonas (A y B) correspondientes al tramo ejecutado en 2011, de la senda cargada y a 60 cm del borde de la calzada. Si bien, el cuadro de fisuración de la zona A es más benigno que el de la zona B, ambos sectores muestran el mismo patrón de fisuras (Figura 2). En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados del control y las principales observaciones realizadas sobre los testigos, respectivamente.

Métodos de ensayo

Respuesta mecánica

Los hormigones dañados muestran una declinación en sus propiedades, especialmente en la forma de las curvas tensión-deformación y en el módulo de elasticidad [4]. En línea con este concepto, Crisp et al. [5], basándose en un trabajo previo de Walsh [6], desarrollaron el método de daño por rigidez (stiffness damage index, SDI) para evaluar el deterioro inducido en el hormigón por la RAS. Posteriormente, Sánchez et al. [7] propusieron una serie de modificaciones al método, a fin de optimizarlo, siendo hoy uno de los métodos recomendados para la evaluación de estructuras afectadas por la RAS [8].

Tabla 3: Principales datos del control de calidad del hormigón del sector analizado.

Zona	A	B
Ubicación de los testigos (progresiva)	12k305	1k645
Fecha de ejecución	29/8/2011	6/12/2011
Espesor medio del testigo, según rendimiento (cm)	19,2	16,3
Espesor medio del testigo, medido en testigos (cm)	16,2	16,1
Resistencia a compresión del hormigón, en probetas (MPa)	38,0	40,0
Resistencia a compresión del hormigón, en testigos (MPa)	42,0	42,0

Tabla 4: Principales características de los testigos al momento de su extracción.

Zona	Testigo	Φ	H/A	ADH	Observaciones
A	1	10	24/12	TA	Se presume que la línea de extracción de los testigos coincide con una zona de huella, original, debido a la diferencia entre el espesor medio de la jornada y el del testigo.
	2	10	24/13	TA	
	3	10	23/13	TA	
	4	10	23/12	TA	
	5	15	22/12	TA	
B	6	10	21/10	TA	---
	7	10	16/1	A	La mezcla asfáltica se corta a 1 cm de la interfase hormigón-asfalto.
	8	10	16/0	NA	Si bien hay material asfáltico adherido a la interfase, el espesor de éste es menor a 1 cm.
	9	10	16/14	TA	---
	10	15	15/15	TA	---

Φ : Diámetro del testigo (cm); H/A: Espesor del hormigón y del asfalto adherido (cm); ADH, Grado de adherencia entre hormigón y asfalto: TA (totalmente adherido), A (adherido), NA (no adherido).



Figura 2. Aspecto de la superficie del pavimento en las zonas A (a) y B (b). Vista de los testigos 1 (c) y 8 (d), de las zonas A y B, respectivamente. Nótese la adherencia entre hormigón y asfalto en el testigo 1 (c) y la ausencia de ésta en el testigo 8 (d).

El método adoptado en este trabajo, planteado por Zahedi et al. [9], parte de la extracción de testigos de hormigón, de 10 cm de diámetro, de la estructura bajo estudio. Una vez acondicionados son sometidos a cinco ciclos de carga y descarga en compresión, hasta una tensión igual a 20 MPa (valor adoptado a partir de los datos de la Tabla 3). A partir de las curvas tensión-deformación se calculan los siguientes índices: daño de la rigidez (SDI: stiffness damage index); daño de deformación plástica (PDI: plastic deformation index) e índice de no linealidad (NLI: non linearity index). Los primeros (SDI y PDI, Figura 3) representan, respectivamente, la relación entre la energía/deformación disipada por deformación permanente (cierre y desplazamiento de fisuras) y la energía/ deformación total almacenada en el sistema, durante los cinco ciclos. El NLI ha sido propuesto para valorar la extensión del daño y la orientación de las fisuras y se calcula como $E_{20\%}/E_{40\%}$.

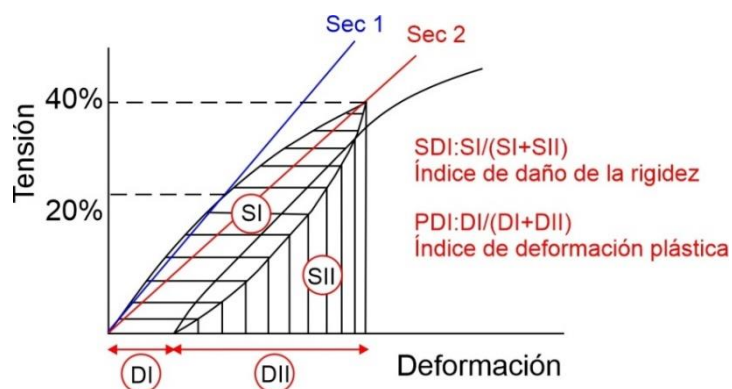


Figura 3: Cálculo esquemático de los índices SDI, PDI y NLI. Tomado de Zahedi et al. [9].

Examen petrográfico

El estudio petrográfico se realizó sobre cuatro testigos, dos de la zona A y dos de la B. Se utilizó un estereomicroscopio Leica S9i y un microscopio óptico petrográfico Leica DM 750P para el análisis de la composición de los agregados y el estudio de la microestructura del hormigón. Se tomaron imágenes a nicols paralelos (N//) y cruzados (NX). Además, se determinó el índice de valoración de daño (*Damage Rating Index*, DRI) para estimar el nivel de daño del hormigón, a partir del conteo de fisuras, en áreas de 1 cm x 1 cm, dibujadas sobre la cara pulida de la mitad de cada testigo, cortado en forma longitudinal. El conteo se realizó bajo estereomicroscopio con una magnificación de 16X. Los diferentes tipos de fisuras se ponderaron en función de su importancia relativa para valorar el daño general. Si bien, el método sugiere trabajar con una grilla de 200 cm², luego se normaliza el resultado a 100 cm² y se obtiene el valor del DRI de la muestra [10].

RESULTADOS

Curvas tensión-deformación

La Figura 4 presenta las curvas tensión-deformación obtenidas con los testigos 1 y 2. Es posible observar que, a diferencia de lo que ocurre en un hormigón sano, donde son pequeñas las diferencias entre el primer y segundo ciclo de carga, y prácticamente no se miden diferencias en las deformaciones a partir del segundo ciclo, en estos hormigones se verifica una deformación creciente, especialmente notoria en el testigo 2. En la Tabla 5 se informan la resistencia a compresión (f'_c) y los índices SDI, PDI y NLI, correspondientes al primer ciclo de carga; también se incluyen SDI₂₋₅ y PDI₂₋₅, promedios de los índices obtenidos en los ciclos 2 a 5. Estos resultados evidencian que existen diferencias entre las muestras extraídas de diferentes sectores, no sólo en la resistencia sino en la deformabilidad, lo que da cuenta de cambios en la estructura interna. En la Figura 5 se muestra la variación de los índices con la resistencia a compresión.

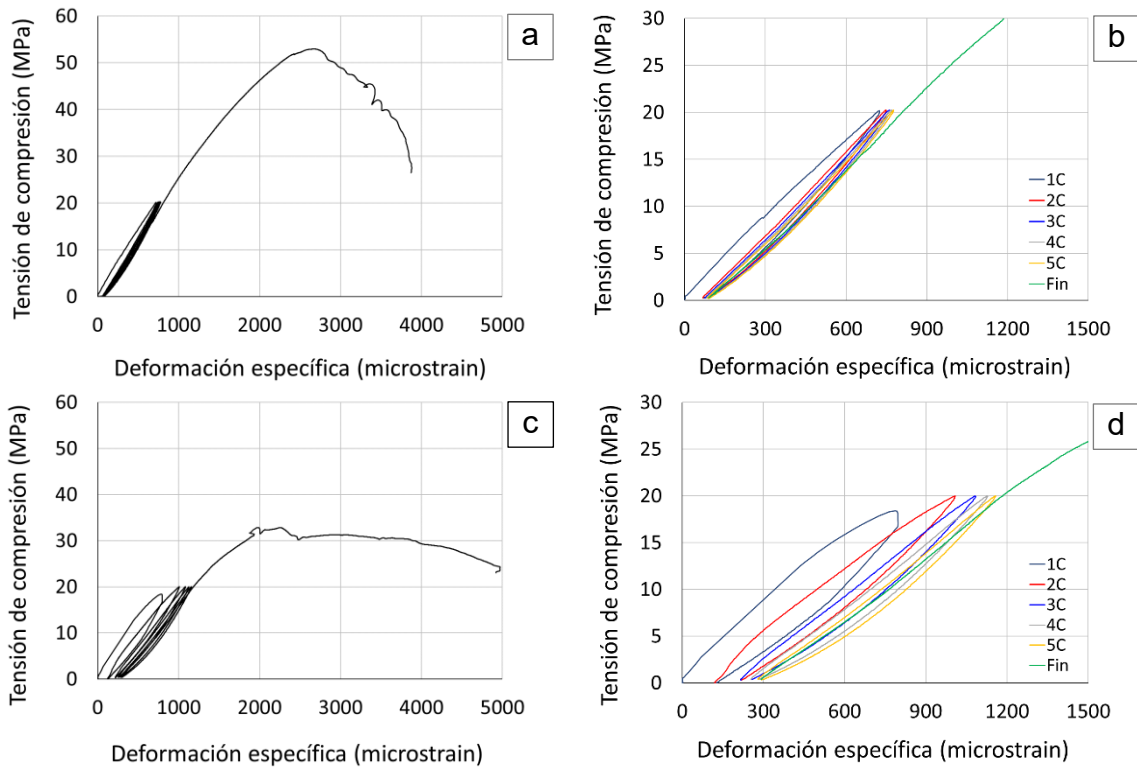


Figura 4: Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo de los testigos 1 (a) y 2 (c). Detalle de las curvas, hasta los 1200 $\mu\epsilon$, de los testigos 1 (b) y 2 (d).

Tabla 5: Resultados de los ensayos mecánicos

Testigo	f_c (MPa)	Ciclo 1			Promedio ciclos 2 a 5	
		SDI SI/(SI+SII)	PDI DI/(DI+DII)	NLI $E_{20\%}/E_{40\%}$	SDI ₂₋₅	PDI ₂₋₅
1	52,9	0,238	0,092	1,070	0,110	0,109
2	32,8	0,440	0,160	1,265	0,440	0,160
3	44,9	0,264	0,100	1,249	0,264	0,100
6	36,2	0,403	0,168	1,206	0,403	0,168

Examen petrográfico

En la Figura 6 se presentan los resultados del examen petrográfico. El agregado grueso es una migmatita milonitizada (Figura 6a), posee abundante cuarzo con extinción ondulante ($AEO \approx 24^\circ$) y cuarzo microcristalino ($< 0,062$ mm). En el agregado fino se observan rocas graníticas, cuarcitas y partículas de calcedonia (Figura 6a). Los testigos 4 y 10 se encuentran en buen estado (Figura 6b), se observan algunos sectores de la pasta carbonatados y no hay evidencias de RAS. Comparativamente, los testigos 5 y 8 presentan mayor deterioro que los anteriores, aunque el estado general es bueno; en sectores puntuales se observan microfisuras ($< 0,020$ mm de espesor) que afectan la pasta de cemento y, en ocasiones, también los agregados finos (Figura 6c). El testigo 5 posee algunas evidencias de RAS, se detectan escasas microfisuras rellenas con productos de reacción bordeando los agregados gruesos y algunas partículas de calcedonia (en el agregado fino). También el testigo 8 posee evidencias de RAS, aunque su desarrollo es incipiente; algunas cavidades presentan relleno parcial de ettringita secundaria. Si bien, se observaron microfisuras en el agregado grueso (Figura 6d), en general, no continúan hacia la pasta de cemento por lo que se interpretan como propias de la roca, previo a su incorporación en el hormigón.

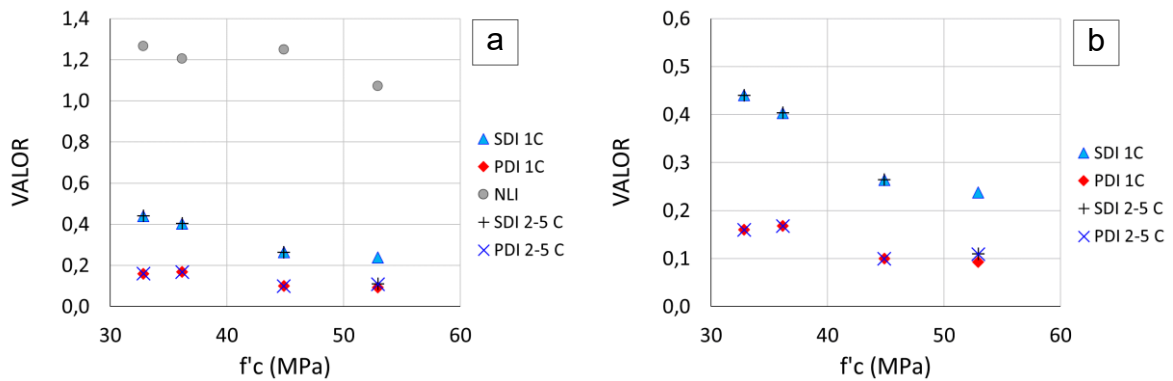


Figura 5: Variación de los índices mecánicos (SDI, PDI, NLI) con la resistencia a compresión del hormigón (b ampliación)

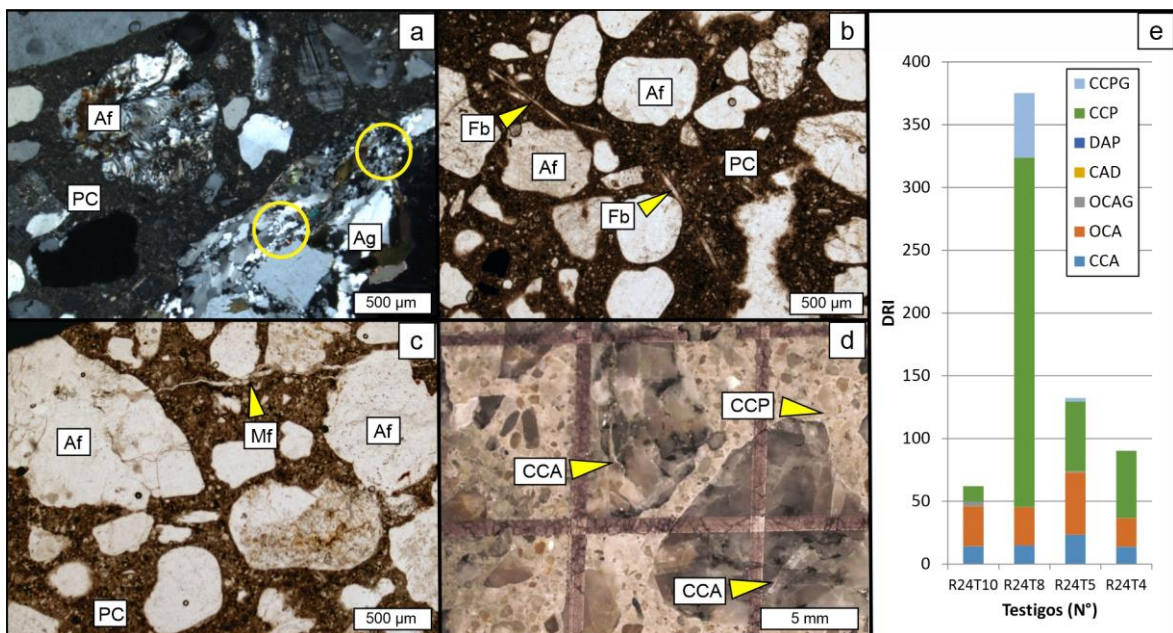


Figura 6: Fotomicrografías (a, NX; b, N//; c, N//; d, con estereomicroscopio). a) Sector con calcedonia (agregado fino, Af) y migmatita milonitizada (parte del agregado grueso, Ag). Los círculos amarillos muestran sectores con cuarzo microcristalino. b) Sector sin evidencias de daño y con fibras (Fb). c) Microfisuras (Mf) en la pasta y los Af. d) Sector del testigo 8 durante el estudio de DRI. e) Resultados del DRI. PC: pasta de cemento, CCA: fisura en el Ag. OCA: fisura abierta en el Ag. OCAG: fisura con producto de reacción en el Agr. CAD: Agr. desprendido. DAP: partícula de agregado corroída o desagregada. CCP: fisura en PC. CCPG: fisura con producto de reacción en PC.

Los resultados del DRI (Figura 6e) indican un deterioro insignificante [10] en los testigos 4, 5 y 10, con microfisuras, principalmente en el agregado grueso (CCA y OCA) y algunas en la pasta de cemento (CCP). La presencia de relleno en las fisuras es escasa (OCAG y CCPG). Si bien el deterioro del testigo 8 es mayor, principalmente por el desarrollo de microfisuras en la pasta de cemento, tanto vacías como con productos de reacción (CCP>CCPG); su nivel de daño es marginal a moderado [10].

DISCUSIÓN Y CONSIDERACIONES FINALES

A pesar del cuadro de fisuración generalizado que poseen las losas, el estado actual de servicio del pavimento, en el tramo de ruta analizado, es altamente satisfactorio, habiendo transcurrido cerca del 80 % de la vida útil de diseño. Por tratarse de un

hormigón con fibras, aún con fisuras, es esperable que conserve una capacidad resistente residual. Si bien, el espesor medio medido sobre los testigos (≈ 16 cm) es similar para las dos zonas evaluadas (A y B), el espesor promedio del pavimento en la zona A (volumen de hormigón colocado/superficie construida = 19,2 cm), resulta superior al de la zona B (16,3). Esto, sumado al hecho de que la ejecución de ambos tramos se llevó a cabo bajo condiciones climáticas disímiles (zona A: invierno; zona B: verano), podría explicar, entre otros factores (grado de adherencia con la capa asfáltica), los diferentes grados de fisuración observados sobre la superficie del pavimento. La evaluación de la resistencia indicó diferencias entre los testigos. Las curvas tensión-deformación aplicando ciclos de carga y descarga verificaron un incremento progresivo de la deformabilidad que puede asociarse a defectos internos. Mientras el índice SDI creció a medida que la resistencia disminuía; los índices NLI y PDI no resultaron tan sensibles a las variaciones en la resistencia. Si bien el examen microscópico mostró algunos signos localizados de RAS, según los resultados del DRI, el grado de deterioro de los testigos es despreciable (o, a lo sumo, marginal) y su estado general es bueno. Dado que los signos de RAS detectados no guardan relación con la magnitud del deterioro del hormigón, es difícil hallar elementos de juicio para permitan atribuir el daño del hormigón a la RAS. En base a lo expuesto, es posible inferir que el deterioro observado en la respuesta mecánica del hormigón pueda ser atribuido a los efectos de fatiga del material (la estructura transita el período final de su vida útil), combinados con posibles defectos generados durante la etapa constructiva (por ejemplo, vacíos de compactación), desestimando a la RAS como parte de este mecanismo.

AGRADECIMIENTOS

Al CGAMA (CIC-UNS), CICIPBA, Dto. Geología UNS y CICTERRA (CONICET-UNC).

REFERENCIAS

- [1] Pastorini M., "Experiencia en Uruguay: Proyecto de rehabilitación con whitetopping en Ruta Nacional N° 24", Memorias, 8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo (2011).
- [2] Fontáns D., Machín H., Míguez D., González A.C., Violini D., Pappalardi M., "Novedosa repavimentación en Uruguay mediante la aplicación de una capa adherida de hormigón con fibras sintéticas estructurales empleando tecnología de alto rendimiento", XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito AAC, Sem. Int. Pav. de Hormigón, Córdoba, Argentina (2012).
- [3] Fontáns D., et al., "Desempeño de un tramo de carretera en Uruguay rehabilitado mediante la ejecución de una capa adherida de hormigón reforzado con fibras" Memorias, XVIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (2022).
- [4] Giaccio G., Zerbino R., Ponce J.M., Batic O.R., "Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction", Cement and Concrete Research, V. 38, Issue 7 (2008), pp. 993-1004.
- [5] Chrisp T. M., Waldron P., Wood J.G.M., Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete, Magazine of Concrete Research, V. 45, No. 165 (1993), pp. 247-256.
- [6] Walsh J.B., "The effects of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks", J. Geophys. Res. 70 (1965), pp. 339-411.
- [7] Sánchez L.F.M., Fournier B., Jolin M., Bastien J., Mitchell D., "Practical use of the stiffness damage test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction", Construction and Building Materials 125 (2016), pp. 1178-1188.
- [8] Fournier B., Bérubé M.A., Folliard K.J., Thomas M., "Report on the diagnosis, prognosis, and mitigation of alkali-silica reaction (ASR) in transportation structures", Report FHWA-HIF-09-004, Federal Highway Administration, Washington, D.C. (2010), 147 pp.
- [9] Zahedi A., Trottier C., Sánchez L.F.M., Noël M., "Condition assessment of alkali-silica reaction affected concrete under various confinement conditions incorporating fine and coarse reactive aggregates", Cem. & Concr. Res. 153 (2022), p. 106694.
- [10] Sánchez L.F.M., Fournier B., Jolin M., Bastien J., Mitchell B., "Overall assessment of alkali-aggregate reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures", Cem. & Concr. Res., 93 (2017), pp. 17-31.