

## Estudio de la microestructura de pavimentos de hormigón deteriorados de las ciudades de Mar del Plata y La Plata, provincia de Buenos Aires

G. S. Coelho dos Santos<sup>a\*</sup>, S. A. Marfil<sup>b</sup>, F. Locati<sup>c</sup> y L. P. Traversa<sup>d</sup>

<sup>a\*</sup>Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT, CIC), Facultad de Ciencias Naturales y Museo - Universidad Nacional de La Plata, CP 1900, La Plata, Argentina. [gabrielacoelho@fcnym.unlp.edu.ar](mailto:gabrielacoelho@fcnym.unlp.edu.ar)

<sup>b</sup>Departamento de Geología - Universidad Nacional del Sur, Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA, CIC-UNS), CP 8000, Bahía Blanca, Argentina. [smarfil@uns.edu.ar](mailto:smarfil@uns.edu.ar)

<sup>c</sup>Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA, CONICET-UNC), Facultad de Ingeniería - Universidad Católica de Córdoba, CP X5016GCA, Córdoba, Argentina. [flocati@unc.edu.ar](mailto:flocati@unc.edu.ar)

<sup>d</sup>Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT, CIC), CP 1900, La Plata, Argentina. [direccion@lemit.gov.ar](mailto:direccion@lemit.gov.ar)

Recibido: 7 de noviembre de 2021

Aceptado: 29 de diciembre de 2021

### RESUMEN

En este trabajo se evaluaron pavimentos de hormigón de las ciudades de Mar del Plata y La Plata, confeccionados con agregados gruesos cuarcíticos. Se observó importante grado de fisuración y deterioro de los pavimentos, en algunos casos con reemplazo parcial o total del hormigón. Se tomaron muestras y se determinó densidad, absorción, volumen de poros permeables y densidad de fisuras por microscopía. Se realizaron estudios microestructurales complementarios mediante estereomicroscopía, microscopía óptica de polarización y microscopía electrónica de barrido en los diferentes hormigones, a excepción del pavimento de La Plata que fue evaluado por estas técnicas en un trabajo previo. Los estudios microestructurales permitieron identificar microfisuras y materiales de neoformación (ettringita y productos de la reacción álcali-sílice). Las patologías descritas, se asocian a la calidad del hormigón, al tipo de agregado utilizado y a otras causas externas como la fisuración por cargas.

**PALABRAS CLAVE:** Pavimento, deterioro, densidad de fisuras, petrografía

### ABSTRACT

In this work, concrete pavements from the cities of Mar del Plata and La Plata, elaborated with coarse quartzitic aggregates, were evaluated. Significant cracking and deterioration of pavements were observed, in some cases with partial or total concrete replacement. Samples were taken and density, absorption, permeable pores volume and cracks density by microscopy were determined. Complementary microstructural studies were performed by stereomicroscopy, polarizing microscopy and scanning electron microscopy in the different concretes, except in La Plata pavement, which was evaluated with these techniques in a previous work. Microstructural studies allowed identifying microcracks and neof ormation materials (ettringite and alkali-silica reaction products). The pathologies described are associated with concrete quality, the aggregates used and other external causes such as cracking due to loads.

**KEYWORDS:** Pavement, deterioration, crack density, petrography

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Coelho dos Santos, G. S., Marfil, S. A., Locati, F., y Traversa, L. P. (2022). Estudio de la microestructura de pavimentos de hormigón deteriorados de las ciudades de Mar del Plata y La Plata, provincia de Buenos Aires. *Revista Hormigón*, 61, 34–51. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/kjsfqkz2j>

## 1. Introducción

Las causas de deterioro de una estructura de hormigón pueden ser varias, entre ellas se encuentran la corrosión del acero de refuerzo, el ataque externo por el ingreso de sulfatos y las reacciones deletéreas internas, como la reacción álcali-agregado (RAA) o más comúnmente la reacción álcali-sílice (RAS). Esta última, definida por primera vez por Stanton [1], se genera por la reacción química entre los agregados que contienen sílice metaestable (ópalo, calcedonia, tridimita, cristobalita, vidrio volcánico, o cuarzo tensionado y microcristalino), y los álcalis ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ), que componen la solución de poro del hormigón, en presencia de una alta concentración de iones  $\text{OH}^{-}$  y una elevada humedad relativa. Esta reacción genera productos de neoformación que producen tensiones internas, lo que provoca problemas de durabilidad y reduce la vida útil de las estructuras [2-4].

Las cuarcitas, habitualmente usadas en Argentina como agregados de trituración para la elaboración de hormigón, son rocas compuestas casi exclusivamente por cuarzo y son abundantes en la provincia de Buenos Aires, tanto en el área de las Sierras Septentrionales, como en las Sierras Australes. En las Sierras Septentrionales, son importantes los afloramientos de las arenitas cuarzosas o cuarcitas de la Formación Balcarce [5], que actualmente se explotan en varias canteras de la localidad de Batán, partido de General Pueyrredón, cercano a la ciudad de Mar del Plata; mientras que otras canteras, como las del partido de Balcarce, se encuentran inactivas hace décadas [6-9].

Coelho dos Santos [9] y Coelho dos Santos et al. [8,10,11] realizaron estudios sobre las cuarcitas de Mar del Plata en cuanto a su reactividad alcalina potencial frente a la RAS utilizando ensayos petrográficos y físicos normalizados. La mayoría de las muestras analizadas fueron calificadas como no reactivas, a excepción de un frente en una cantera en actividad donde se reconocieron cuarcitas con una matriz compuesta por ópalo y calcedonia. La potencial reactividad de esta muestra fue confirmada mediante el ensayo

acelerado de la barra de mortero [12] y del prisma de hormigón convencional y acelerado [13].

Antecedentes del estudio petrográfico de hormigones de obra, confeccionados con cuarcitas de Mar del Plata, son escasos. Coelho dos Santos et al. [14], estudiaron mediante petrografía, microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, losas de hormigón (de la base y capa de rodamiento) removidas de la Avenida 122 de la ciudad de La Plata. Con microscopía de luz polarizada, los autores observaron fisuras tanto en las interfases como en la pasta de cemento, principalmente en el hormigón de la capa de rodamiento (122RO), mientras que en el hormigón de la base (122B) observaron mayor porosidad de la pasta de cemento. Ambos hormigones presentaban fuerte carbonatación de la pasta cementicia y ettringita como principal material de relleno de cavidades y fisuras.

Una técnica habitualmente empleada para el estudio de la microestructura en hormigones es la microscopía con luz UV incidente (epifluorescencia). Consiste en impregnar las muestras con resina fluorescente para visualizar con facilidad zonas de mayor y menor porosidad y microfisuras, incluso aquellas de espesor inferior al detectado con la resolución del microscopio de luz transmitida polarizada. Se debe tener en cuenta que el ancho medido en las fisuras resulta ser aparente, por lo que el espesor de las fisuras muy finas puede verse aumentado, ya que la luz UV no se encuentra polarizada [15,16]. También, mediante el procesamiento de imágenes con software específico se puede determinar el área fisurada y la densidad de fisuras. Madsen et al. [17,18], determinaron el área fisurada y la densidad de fisuras en barras de mortero y prismas de hormigón con signos de la RAS, y concluyeron sobre este método que, a pesar de que se necesita un volumen de procesamiento de datos importante para alcanzar una correlación confiable entre el área fisurada y los valores de expansión, los resultados alcanzados permiten estimar el grado de deterioro de las muestras

estudiadas. A su vez, Berezosky et al. [19] utilizaron esta misma técnica para evaluar el grado de deterioro de barras de mortero confeccionadas con agregados finos reactivos de la zona de Bahía Blanca y concluyeron que el área fisurada se correlaciona mejor con la expansión medida en el ensayo acelerado, en comparación con la densidad de fisuras, ya que este último parámetro no considera el ancho de las mismas.

En este trabajo se analizaron pavimentos de hormigón de las ciudades de Mar del Plata y La Plata que presentaban fisuración y otras evidencias de deterioro. El objetivo fue estudiar la microestructura de los mismos mediante diferentes técnicas microscópicas y relacionarlas con los valores de densidad, absorción y volumen de poros permeables de cada uno de los hormigones para poder establecer las posibles causas de deterioro. Parte de los estudios microestructurales (estereomicroscopía, microscopía con luz polarizada y microscopía electrónica de

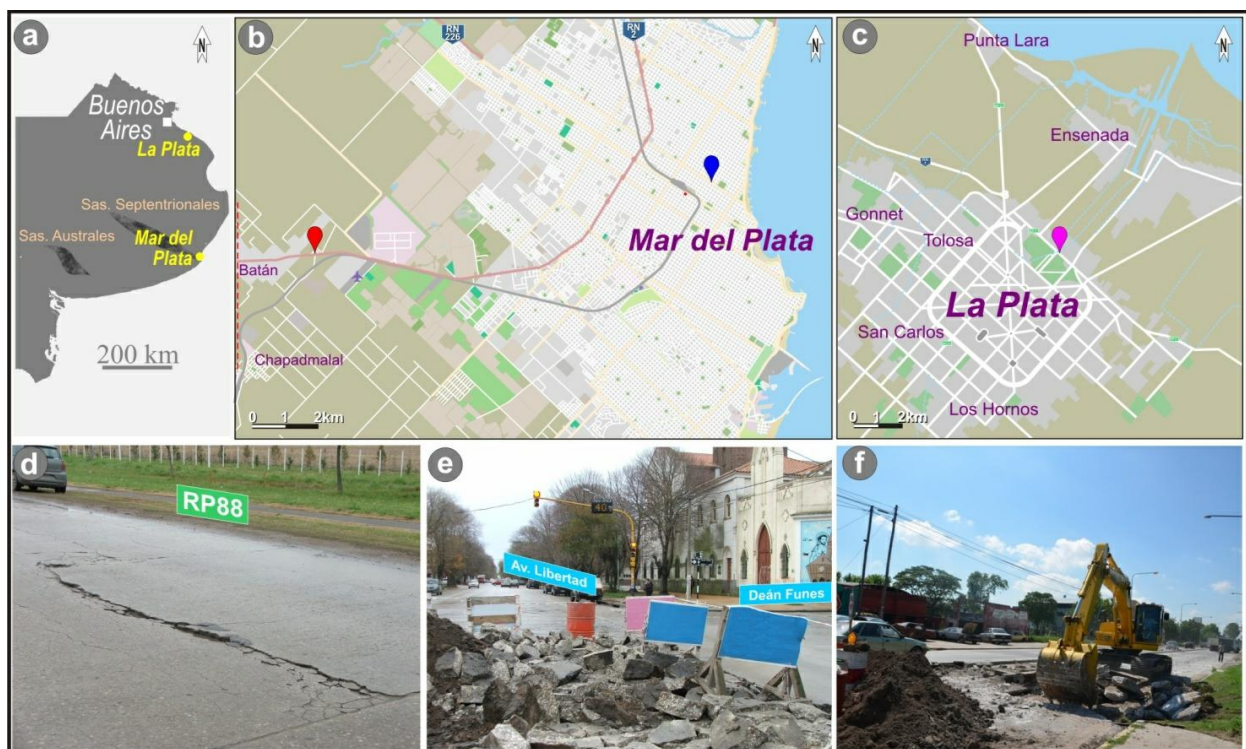
barrido) de los hormigones de la ciudad de La Plata fueron presentados en un trabajo previo [14], lo cual se complementa con el análisis microestructural en el presente trabajo.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Antecedentes

Se realizó el relevamiento de pavimentos de hormigón de las ciudades de Mar del Plata (Ruta Provincial 88 y Avenida Libertad) y La Plata (Avenida 122 o Ruta Provincial N° 11), los cuales fueron oportunamente levantados y reemplazados parcial o totalmente debido a que presentaban un importante deterioro (Fig. 1).

La Avenida 122 (Av. 122) de la ciudad de La Plata tiene la particularidad de haber sido fundada en un límite geológico/geomorfológico de nivel regional, que separa la llanura alta donde se asienta la ciudad en sí



**Figura 1.** a. Ubicación de las ciudades de La Plata y Mar del Plata en la provincia de Buenos Aires. b. Localización de los pavimentos muestreados del partido de General Pueyrredón. c. Localización de la Av. 122 en la ciudad de La Plata. d. Fotografía del pavimento RP88. e. Fotografía del pavimento demolido AvL. f. Fotografía del hormigón levantado de la Av. 122 (tomada de la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires).

misma y la llanura costera, que se manifiesta mediante un resalto o escalón comprendido entre las cotas 5 y 7,5 msnm, que señala el límite interno de erosión relacionado con el máximo avance de la transgresión holocena [20,21]. El escalón está muy bien expresado en el tramo Quilmes - La Plata a lo largo de la Av. 122 y la Ruta Provincial N° 11 (RP11) que marcan el límite del partido de La Plata con los de Ensenada y Berisso [20]. Cabe desatacar que el trazo de la Av. 122 fue establecido en la parte basal de este escalón, donde se reconocen suelos constituidos por sedimentos fangosos y cordones de conchillas [21]. Esta avenida, de carácter netamente urbano, recibe además todo el tránsito pesado de conexión portuaria y de productos que salen del polo petroquímico [22]. El pavimento, constituido por dos hormigones, uno de base (122B) y otro de rodamiento (122RO), fue sustituido en varios tramos a lo largo de la traza del casco urbano. Las losas presentaban desniveles importantes entre juntas y fisuras [23].

Los pavimentos del Partido de General Pueyrredón están asociados tanto al ambiente serrano de Tandilia como costero [24,25]. El área de la traza de la Ruta Provincial 88 (RP88), desde la localidad de Batán hacia Mar del Plata, se ubica en una zona de lomas y llanura ondulada que corresponde a suelos de baja consolidación, de textura limo-arenosa, limo-arcillosa y, en algunos sectores, arenas medianas a finas que fueron transportadas y depositadas en forma de manto. En la llanura los suelos están constituidos por materiales finos arcillosos susceptibles a la erosión y con alto contenido de sodio de intercambio [25]. Por otra parte, la Av. Libertad (AvL) de la ciudad de Mar del Plata es paralela a la Avenida Pedro Luro (Ruta Nacional N° 226), seis calles al norte de la misma, y desemboca en la Avenida Peralta Ramos (costanera) a la altura de la playa La Perla [9,26]. La Av. Libertad entre Dorrego y Av. Jara (12 cuadras que incluyen a la zona muestreada) estaba constituida por un pavimento de hormigón con cordón integral de 14 m de ancho, con un importante grado de deterioro y un PCI (*Pavement Condition*

*Index*) menor de 40 [27], de acuerdo al relevamiento realizado en el año 2012 mediante el Sistema de Gestión de Pavimentos implementado con el software MICROPAVER del Cuerpo de Ingenieros del ejército de Estados Unidos. Además, es importante mencionar que la avenida representa la entrada y salida de todos los colectivos de larga distancia desde la Nueva Terminal Ferroautomotora hacia la RN 2, RN 226 y RP 88 [28]. Los suelos de la zona urbana son materiales de relleno no identificados [26], aunque a grandes rasgos la ciudad de Mar del Plata está fundada sobre suelos finos arcillosos similares a los del resto del Partido de General Pueyrredón [29].

En todos los casos los hormigones fueron confeccionados con un agregado grueso de trituración cuarcítico (piedra Mar del Plata) proveniente de canteras de la Localidad de Batán [30].

En la Tabla 1 se resumen algunas características de cada estructura, obtenidas de diferentes fuentes bibliográficas [20,22-26,28,31,32].

## 2.2 Materiales

En este trabajo se analizaron muestras de hormigón pertenecientes a fragmentos de las losas demolidas del pavimento de la AvL de Mar del Plata (Fig. 1e) como de la Av. 122 de La Plata (Fig. 1f). Los hormigones muestreados de la Av. 122 de la ciudad de La Plata pertenecen a losas de 18 cm de espesor que corresponden a la base (122B) y capa de rodamiento (122RO). Las muestras fueron tomadas de escombreras a la altura de la Calle 52 (Figs. 1c y 1f). De la AvL (Mar del Plata) se tomaron muestras de losas demolidas de 18 cm de espesor, a la altura de la calle Deán Funes. El peso aproximado de material muestreado fue de unos 20 kg de muestra por cada obra. En el caso de la RP88 se tomaron muestras de fragmentos desprendidos del sector superior del pavimento (10 cm - 15 cm) en el tramo de acceso a la localidad de Batán en dirección a la ciudad de Mar del Plata (Fig. 1d).

**Tabla 1.** Características de las estructuras estudiadas.

Estructura/ Año de construcción	Diseño del pavimento			Suelo de la región	Reemplazo del pavimento
	Sub-base	Base	Pavimento de hormigón		
Av.122 (RO/B)/ 1964	Tosca compactada	Hormigón de 18 cm	18 cm de espesor con juntas aserradas	Fino, con alto contenido de sodio intercambiable	Total en tres tramos
AvL/ Circa 1970	Suelo mejorado	¿?	14 m de ancho y 18 cm de espesor	De relleno urbano (indiferenciado)	Parcial: solo lasas afectadas
RP88/ En dos etapas: 1943 y 1961	Tosca compactado de 10 cm	¿?	1943: pavimento de 3 m de ancho. 1961: segunda vía de hormigón simple de 3,7 m de ancho y 18 cm de espesor	Limo-arcilloso/arenoso, con zonas más llanas arcillosas y en algunos casos con alto contenido de sodio intercambiable. Anegados en sectores	Total en el tramo Batán-Mar del Plata

(¿?) Sin especificar.

En la Fig. 2 se muestra un detalle de algunas de las muestras estudiadas provenientes de cada estructura. El hormigón 122RO presenta un buen estado general, con escasas microfisuras y cavidades de aire accidental generalmente vacías (Fig. 2a). El hormigón 122B, por otro lado, evidencia mayor desarrollo de microfisuras (Fig. 2b) y las cavidades por lo general están rellenas de un material de color blanco y fibroso, posiblemente ettringita (Fig. 2c). El hormigón AvL muestra un buen estado general (Fig. 2d), aunque localmente se observan algunos productos de neoformación en cavidades de aire accidental. El hormigón RP88 presenta sectores con el mortero de coloración blanquizca, posiblemente efecto de la carbonatación de la pasta de cemento (Fig. 2e) y se observa en la interfase entre el agregado grueso y el mortero el desarrollo de productos de neoformación de color blanco (Fig. 2f).

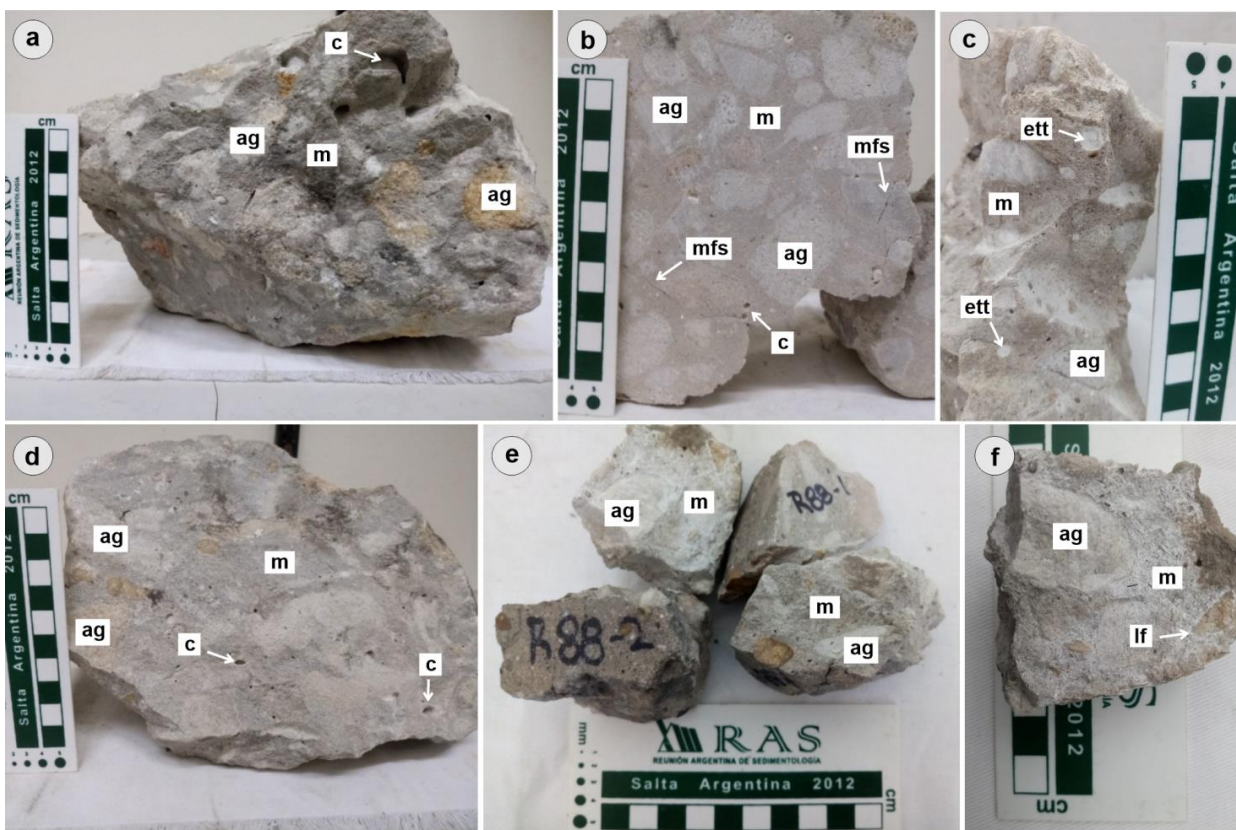
### 2.3 Métodos

En el Laboratorio LEMIT-CICPBA de La Plata se realizaron ensayos de densidad, absorción y volumen de poros permeables de los diferentes hormigones, y estudios

petrográficos con estereomicroscopio (EM) Olympus SZ61 y microscopio petrográfico (MP) Olympus BH2-UMA.

La densidad, absorción y volumen de poros permeables fueron determinados según los lineamientos de la norma ASTM C642 [33]. La muestra constó de varias porciones de hormigón que se ensayaron por separado y luego se calculó el promedio de los resultados individuales, para cada parámetro evaluado. Según la norma, las muestras pueden tener cualquier forma y tamaño, siempre que el volumen de cada porción no sea menor a 350 cm<sup>3</sup> (para hormigones de peso normal equivale aproximadamente a 800 g). Se secaron en horno hasta obtener masa constante, entre 100 °C y 110 °C, por 24 horas. Se retiraron del horno, se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente en un desecador, se pesaron y se determinó la masa seca (A). Luego se sumergió en agua a temperatura ambiente por 48 horas, se retiró y se secó superficialmente la muestra con un paño absorbente. Se pesó y se determinó la masa en condición saturada y superficie seca (B). Luego se colocó la muestra en un recipiente con agua y se hirvió durante 5 horas. Se lo dejó enfriar hasta temperatura ambiente en el mismo recipiente y luego se





**Figura 2.** Fotografías de muestras correspondientes a los pavimentos estudiados. a. Hormigón 122RO. b. Hormigón 122B. Se observan algunas microfisuras. c. Detalle del hormigón 122B con cavidades rellenas de ettringita. d. Hormigón AvL. e. Hormigón RP88. f. Detalle de un fragmento del hormigón RP88 donde se observa carbonatación de la pasta de cemento y desarrollo de productos de neoformación en la zona de interfase entre el agregado grueso y el mortero. ag: agregado grueso, c: cavidad, ett: ettringita, lf: interfase, m: mortero, mfs: microfisura.

secó superficialmente la muestra con un paño absorbente y se pesó. Con este procedimiento se determinó la masa saturada y superficie seca luego del hervor (C). Luego de la inmersión y hervor de la muestra, se la suspendió en un canasto sumergido en agua y se determinó la masa aparente con balanza hidrostática (D). Finalmente, con estos datos se calcularon los valores de densidad relativa en estado saturado y superficie seca (1), absorción (2) y volumen de espacios vacíos o porosidad (3). Como porosidad se consideró los espacios vacíos que quedaron en la masa del hormigón, a consecuencia de la evaporación de agua excedente del amasado y del aire naturalmente atrapado en su manipulación.

$$d = \left( \frac{C}{C-D} \right) \quad (1)$$

$$A(\%) = \left( \frac{B-A}{A} \right) * 100 \quad (2)$$

$$P(\%) = \left( \frac{C-A}{C-D} \right) * 100 \quad (3)$$

Para la observación y toma de imágenes con EM y MP de los hormigones se contó con una cámara digital acoplada (Infinity 1). De forma complementaria las secciones delgadas también fueron estudiadas bajo microscopio de polarización Leica M4500 P LED con luz UV incidente (epifluorescencia, MPF), del Instituto CICTERRA (CONICET-UNC). Finalmente, se realizaron estudios de morfología y composición de los materiales de neoformación con microscopio electrónico de barrido acoplado con un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (MEB-EDS),

FEI Quanta 200, del Laboratorio LIMF-UNLP de La Plata.

Para la confección de las secciones delgadas para el análisis mediante MPF, primero se realizó la impregnación de los hormigones con resina epoxi teñida con fluoresceína sódica. El estudio con luz UV incidente se llevó a cabo con una magnificación x100, con un barrido continuo del área ocupada por la sección delgada (25 mm x 35 mm) y mediante un total de 10 imágenes en cada sección. Para discriminar las fisuras (microfisuras) en las imágenes se realizó un mapeo semiautomático mediante el software ImageJ [34]. Se importaron las imágenes con ajuste del umbral para resaltar las áreas de interés y con conversión en imágenes binarias de 8 bit. Sobre estas imágenes se mapearon las fisuras. Finalmente se calculó la suma total de la longitud de todas las fisuras medidas sobre cada imagen (medida lineal) sobre el total de área analizada (área según valor calibrado, borde x borde = unidad<sup>2</sup>), obteniéndose la “densidad de fisuras” en mm/mm<sup>2</sup>. Cada imagen tiene una dimensión de 2,77 mm x 2,08 mm, lo cual da un área total por imagen de 5,76 mm<sup>2</sup>.

### 3. Resultados

#### 3.1 Relevamiento de los pavimentos

Se relevó un sector de la RP88 en la zona de acceso a la localidad de Batán en dirección a la ciudad de Mar del Plata, donde se observaron losas de hormigón con un estado de deterioro avanzado, afectadas por fisuras transversales, longitudinales y diagonales (Fig. 3a) y, en sectores de las esquinas, se observó fisuración en forma de “mapa”, erosión en juntas, hundimientos, y desprendimiento de trozos del pavimento que generaron grietas y baches con acumulación de agua (Figs. 3b y 3c). En la superficie de rodamiento se observó el agregado cuarcítico expuesto (Figs. 3b y 3c). El pavimento en el tramo Batán-Mar del Plata fue demolido y reemplazado en su totalidad.

En las Figs. 3d, 3e y 3f se muestra el pavimento de la AvL de la ciudad de Mar del Plata. En las losas aledañas al sector muestreado se observaron fisuras tanto transversales como longitudinales, apertura de fisuras, desprendimientos y trabajos de bacheo cercanos a las juntas (Fig. 3e).



**Figura 3.** Relevamiento de los pavimentos de Mar del Plata: RP88 (a,b,c) y AvL (d,e,f). a. Losa con fisuras, desprendimientos y erosión de juntas. b. Patrón de fisuras tipo “mapa”. c. Desprendimiento de material y grietas con encharcamiento. d. Fragmentos de losa del tramo removido. e. Desarrollo de fisuras (mayores a 1 cm) y erosión en juntas (bache) en un tramo de losa en servicio. f. Losas removidas.

En este caso el reemplazo de las losas fue parcial, es decir, solamente en los sitios más afectados.

Por otra parte, las muestras de hormigón de la ciudad de La Plata fueron tomadas de escombreras de los sectores demolidos de la Av. 122 (Fig. 1f), correspondiendo a losas de la base (122B) y de la capa de rodamiento (122RO). Este pavimento fue reemplazado en un tramo de 5 km (de la Av. 32 hasta la Calle 80). Esta avenida constituye una vía de acceso a la ciudad y al área portuaria, por lo que tiene una alta densidad de tránsito pesado, y conecta con la RP11. Antes de su reemplazo, la capa de rodamiento presentaba fisuras transversales y longitudinales, erosión en juntas y bordes, y escalonamientos.

### 3.2 Densidad, absorción y volumen de poros permeables (ASTM C642)

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los valores promedio de densidad, absorción y volumen de poros permeables de cada hormigón. El valor promedio fue obtenido a partir de 4 muestras de cada uno de los hormigones estudiados.

La densidad de los hormigones de la Avenida 122 es la misma para ambos, pero la absorción de 122B es mayor que 122RO, coincidente con un mayor volumen de poros permeables. Por otra parte, los hormigones

de la AvL y la RP88 tienen también similar densidad, pero el valor promedio de la absorción y volumen de poros permeables es mayor en la RP88. El desvío estándar de la densidad en general es uniforme; sin embargo, el desvío de la absorción y volumen de poros permeables se alejan más de la media, mostrando una heterogeneidad del hormigón respecto de estos parámetros. En la Fig. 4 se observa una buena correlación lineal entre los valores de absorción (%) y volumen de poros interconectados (%) en los hormigones estudiados.

### 3.3 Análisis microestructural de los hormigones

Como se mencionó anteriormente, se presentan en este apartado solo los resultados de estereomicroscopía, microscopía óptica de polarización y MEB-EDS de los hormigones AvL y RP88, ya que los estudios petrográficos de los hormigones de la Av. 122 fueron publicados en un trabajo previo [14]. Por otro lado, la determinación de la densidad de fisuras mediante microscopía con epifluorescencia se realizó en los hormigones de las tres estructuras.

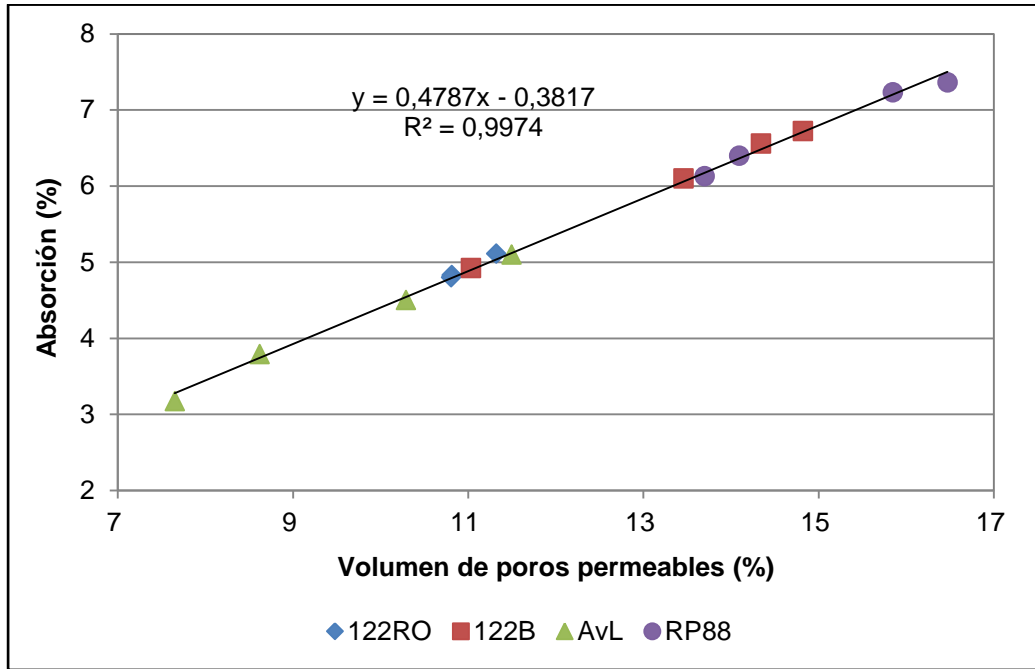
#### 3.3.1 Estereomicroscopía

El hormigón AvL está constituido por un agregado grueso cuarcítico correspondiente a

**Tabla 2.** Valores promedio y desvío estándar de densidad, absorción y volumen de poros permeables (ASTM C642 [33]).

Hormigón	Densidad		Absorción (%)		Volumen de poros permeables (%)	
	Promedio	Desvío	Promedio	Desvío	Promedio	Desvío
122RO	2,34	0,017	4,9	0,17	11,0	0,29
122B	2,34	0,017	6,1	0,81	13,4	1,68
AvL	2,40	0,060	4,1	0,84	9,5	1,71
RP88	2,37	0,024	6,8	0,61	15,0	1,34

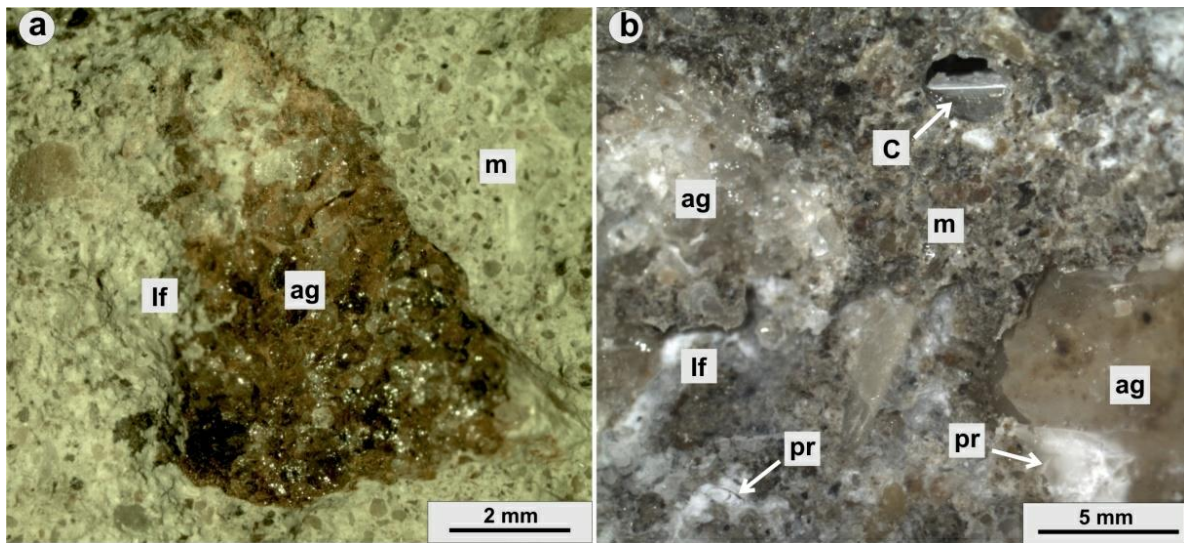




**Figura 4.** Absorción (%) vs. volumen de poros permeables (%) de los hormigones 122RO, 122B, AvL y RP88.

arenitas cuarzosas color blanco grisáceo, blanco amarillento, rosadas y rojizas (Fig. 5a). El mortero está conformado por un agregado fino natural, constituido por cuarzo, feldespatos, fragmentos líticos y conchillas. En la zona de interfase pasta-agregado grueso se identificaron microfisuras y abundantes poros de sección circular de muy

pequeño tamaño (inferiores a 0,5 mm) rellenos por cristales de hábito fibro-radiado, atribuidos a ettringita. Por otro lado, el hormigón de la RP88 está compuesto por un agregado grueso cuarcítico de tamaño máximo de 20 mm, coloración blanco-grisácea, blanco-amarillenta a rosada (Fig. 5b). El agregado fino es una arena



**Figura 5.** Imágenes tomadas con EM. a. Hormigón AvL. Se observa al agregado grueso cuarcítico rojizo y el mortero de coloración blanquecina. b. Hormigón RP88. Se identifican productos de reacción de color blanco en zonas de interfase afectadas por microfisuras, en cavidades y en el mortero. ag: agregado grueso, C: cavidad, lf: interfase, m: mortero, pr: productos de reacción.

natural constituida por cuarzo, feldespatos, fragmentos líticos y conchillas. La pasta de cemento es de coloración gris amarillenta, con cavidades de aire accidentales irregulares o de sección circular, por lo general estas últimas inferiores a 1 mm, algunas de ellas rellenas con productos de reacción (Fig. 5b) y en menor medida por ettringita. La interfase pasta-agregado grueso habitualmente se ve afectada por microfisuras con productos de reacción. En algunos sectores estos productos pueden identificarse en el mortero como se observa en la Fig. 5b.

### 3.3.2 Microscopía óptica de polarización

El hormigón AvL está constituido por un agregado grueso cuarcítico compuesto por clastos de cuarzo límpidos, con extinción normal y ondulante, aunque también se identifican clastos de cuarzo policristalino, microcristalino y fuertemente tensionado. La matriz de las rocas es escasa (menor al 10 %) y está compuesta por caolinita, cuarzo microcristalino y óxidos de hierro. El agregado fino que compone el mortero está compuesto principalmente por cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa, además de conchillas carbonáticas y líticos volcánicos con pastas vítreas. Las interfases con la pasta se hallan afectadas por microfisuras rellenas parcialmente con ettringita (Fig. 6a). También en zonas de interfase se identificaron masas fibrosas de ettringita en poros y cavidades de aire accidental, por lo general pequeñas (500  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ ) tal como se observa en las Figs. 6a, 6b y 6c.

Por otra parte, el hormigón RP88 está constituido principalmente por arenitas cuarcosas (agregado grueso) con una matriz fina (vaques), la cual puede superar el 15 % y está constituida por arcilla, cuarzo microcristalino y ópalo (Fig. 6d). El mortero tiene como agregado fino una arena natural en la cual se identificaron además granos de cuarzo, feldespato, calcedonia, chert y líticos volcánicos con pastas vítreas (Figs. 6e y 6f). La pasta de cemento y las zonas de interfase,

tanto con el agregado grueso como fino, presentan abundantes microfisuras con un patrón en forma de “mapa”, que se asocian a la RAS (Figs. 6e y 6f). La ettringita se observa en algunos sectores de la pasta de cemento como relleno de poros de pequeño tamaño (menor a 200  $\mu\text{m}$ ).

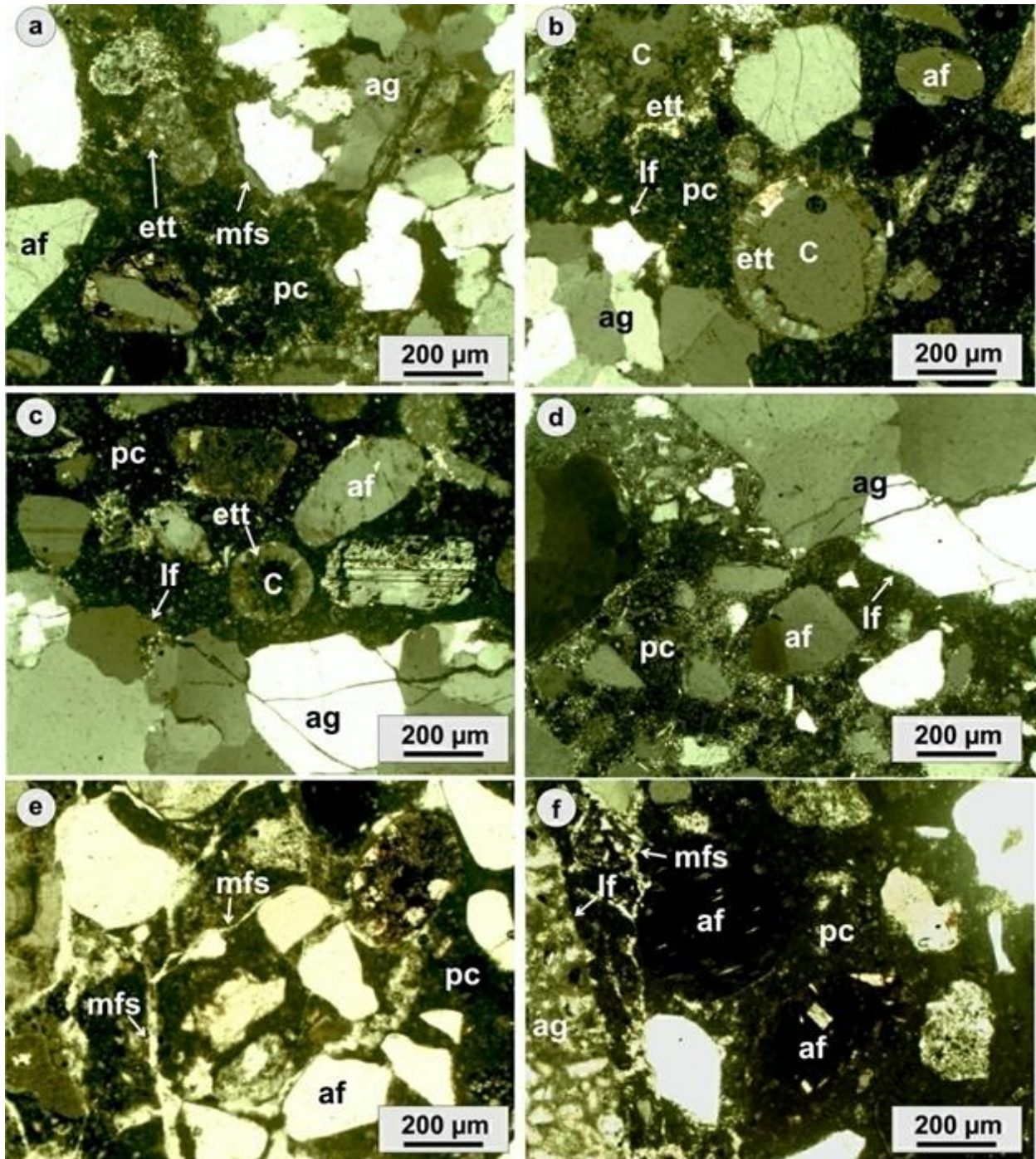
Ambos hormigones presentan sectores con la pasta de cemento carbonatada, con tonalidad amarillo claro y con mayor birrefringencia (Figs. 6a y 6d).

### 3.3.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS)

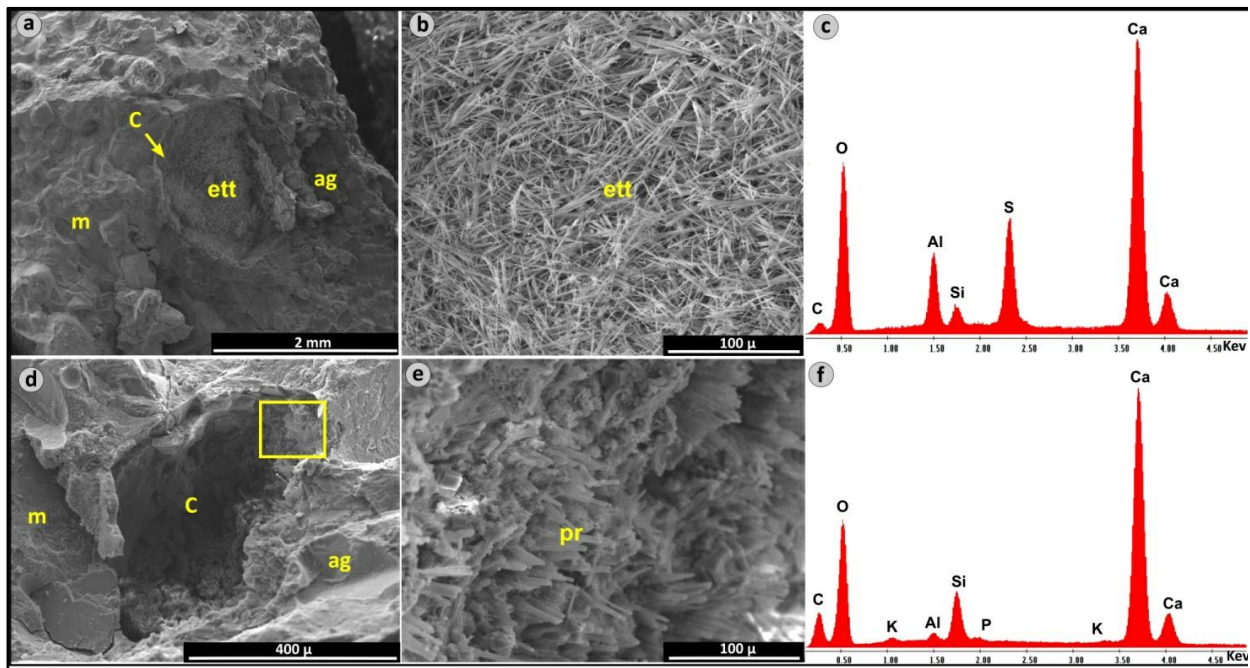
El hormigón AvL presenta cavidades de aire accidental con relleno (Fig. 7a). En la Fig. 7b se observa que el material de relleno de la cavidad presenta morfología fibrosa y hábito acicular típico de ettringita, reflejado también en el espectro composicional EDS (Ca, S y Al), (Fig. 7c). En una segunda cavidad de otro sector de la muestra se observan productos de reacción en forma de fibras cortas de hábito columnar (Figs. 7d y 7e). El espectro composicional muestra un pico intenso de Ca, pero también picos de Si, Al y Na típico de los productos de la RAS (Fig. 7f). Los valores elevados de Ca, de ambos espectros, son atribuidos a la pasta cementicia y a la carbonatación parcial de la misma.

En las muestras de hormigón RP88 se identifican productos de reacción en zonas de la interfase pasta-agregado y en la superficie de las cavidades (Fig. 8a), que presentan una morfología de placas o fibras formando una trama espesa (Figs. 8b y 8c). El análisis composicional con EDS muestra un pico de mayor intensidad de Si, posiblemente exacerbado por la presencia del agregado cuarcítico adyacente al sector analizado, y picos menores de O, Al, Na, K, Ca y Fe (Fig. 8d). Las características morfológicas y composicionales del material analizado podrían corresponder a una estructura tipo zeolítica, relacionada con los productos generados por la RAS.





**Figura 6.** Fotomicrografías de las secciones delgadas de hormigón. a-b-c: AvL. d-e-f: RP88. a. Se observa al agregado grueso cuarcítico sin matriz y una microfisura en la zona de interfase, además de cavidades rellenas con ettringita al igual que en (b) y en (c). d. Se observa un agregado grueso con matriz de cuarzo microcristalino; la pasta de cemento está carbonatada. e. Microfisuras en la pasta de cemento y zonas de interfase. f. Microfisuras finas en la zona de la interfase pasta-agregado; también se observan líticos volcánicos con pastas vítreas en el agregado fino. af: agregado fino, ag: agregado grueso, C: cavidad, ett: ettringita, lf: interfase, mfs: microfisuras, pc: pasta de cemento. Con polarizadores cruzados: a, b, c y d; con polarizadores paralelos: e y f.



**Figura 7.** MEB-EDS (hormigón AvL). a. Se observa una cavidad con material de relleno. b. Detalle del mismo material mostrando hábito acicular, correspondiente a ettringita. c. Espectro composicional EDS de la ettringita observada en (b). d. Cavidad revestida con material de relleno. e. Detalle ampliado de la zona remarcada en (d) con un recuadro amarillo, mostrando el hábito columnar que presenta el material. f. Espectro EDS del material en (e) que muestra la composición típica de productos de la RAS.

ag: agregado grueso, C: cavidad, m: mortero, pr: productos de reacción.

### 3.3.4 Determinación de la densidad de fisuras mediante microscopía con epifluorescencia

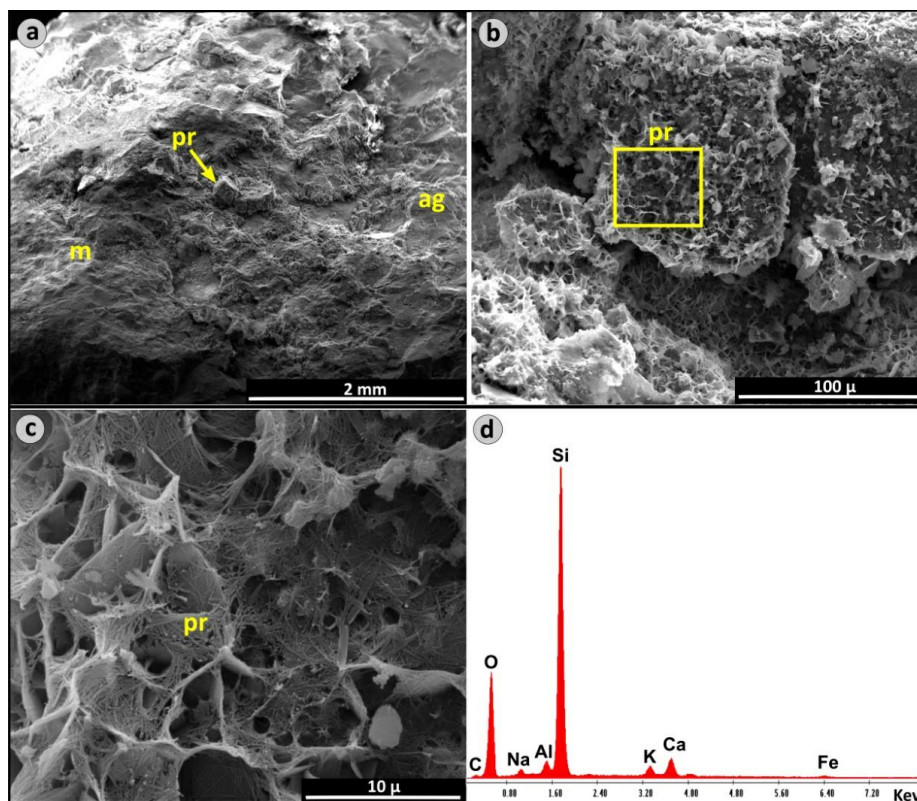
Si bien estudios previos indican que la determinación del área fisurada se correlaciona mejor con los valores de expansión en condiciones de laboratorio [p.ej. 19], su determinación en imágenes de fluorescencia puede verse afectada si la pasta a ambos lados de la fisura tiene mayor porosidad, lo que produce una mayor respuesta lumínica, afectando los resultados sobre el verdadero espesor de las fisuras. Esto puede intensificarse en hormigones de edad avanzada, en los cuales el deterioro de la pasta de cemento en esos sectores de debilidad es mayor. Debido a esta causa es que en este trabajo se mide la densidad de fisuras y no el área fisurada.

En la Fig. 9 se muestran imágenes de secciones delgadas impregnadas con resina fluorescente (fluoresceína sódica adicionada) de los hormigones AvL, RP88, 122B y 122RO. La intensidad de la fluorescencia

varía según el espesor de las fisuras, la presencia y/o abundancia del relleno, la porosidad de la pasta y de los agregados, entre otros factores. El mapeo de las fisuras cubre un área de 5,76 mm<sup>2</sup> por imagen (Figs. 9b, 9d, 9f y 9h). El hormigón AvL evidencia baja fisuración, con mayor desarrollo en las zonas de interfase (Figs. 9a y 9b), mientras que RP88 muestra un patrón de fisuras en mapa y más interconectadas (Figs. 9c y 9d). Es importante remarcar que en el hormigón RP88 además se observa fluorescencia en diversos sectores de la pasta de cemento. Los hormigones de la Av. 122 muestran un patrón de fisuras similar, aunque está más desarrollado en el hormigón de la base (Figs. 9e y 9f) que en el de la capa de rodamiento (Figs. 9g y 9h).

La medida estadística de la densidad de fisuras se realiza mediante el análisis de diez imágenes tomadas sobre cada sección delgada de los hormigones. Así, se obtiene la densidad de fisuración promedio y su desvío estándar (Tabla 3).





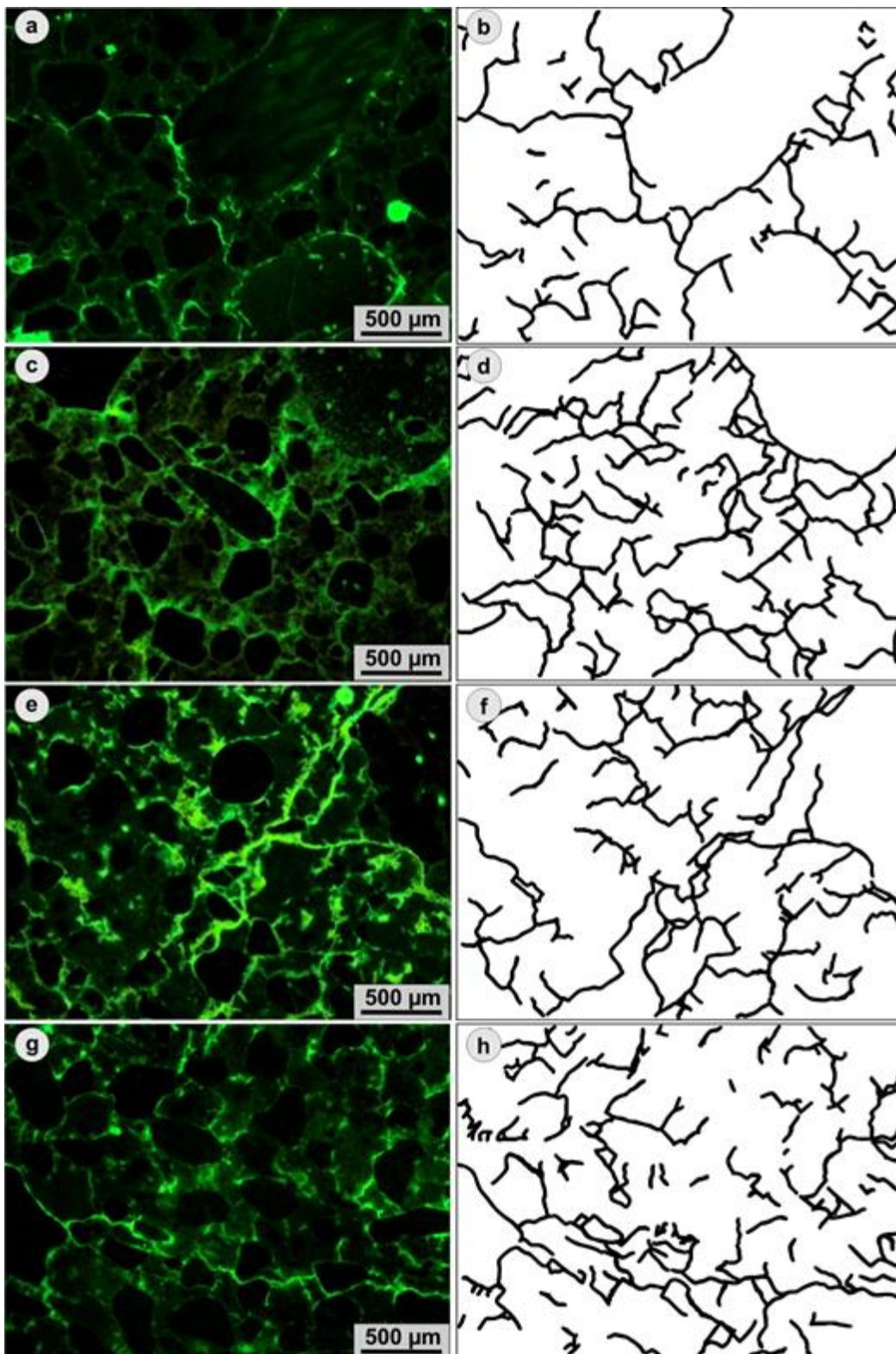
**Figura 8.** MEB-EDS (hormigón RP88). a. Superficie del hormigón con productos de reacción. b. Detalle del producto de reacción señalado en (a). c. Detalle del material en el sector señalado en (b) (recuadro amarillo). d. Espectro composicional EDS del material observado en (c). ag: agregado grueso, m: mortero, pr: productos de reacción.

#### 4. Discusión de los resultados

Las densidades determinadas para los hormigones pertenecientes a la Av. 122 de La Plata (122B y 122RO) son similares, pero el valor de absorción, al igual que el volumen de poros permeables es mayor en 122B. Esto tiene buena correlación con los valores de densidad de fisuras determinados en las secciones delgadas e indicaría una mejor calidad del hormigón de la capa de rodamiento en relación al de la base, en coincidencia con estudios previos [14]. Por otra parte, en los hormigones de Mar del Plata la densidad es ligeramente mayor en comparación con los de La Plata. Los valores de absorción y volumen de poros del hormigón AvL resultan ser los más bajos medidos. Esto se encuentra en concordancia con el bajo valor de densidad de fisuras determinado en las secciones delgadas. Por otro lado, el hormigón RP88 muestra elevados valores de absorción y volumen de

poros, pero la densidad de fisuras no se correlaciona con esos parámetros. Esto podría explicarse debido a la mayor porosidad de la pasta de cemento y no necesariamente al desarrollo elevado de microfisuras. En la Fig. 9c se puede observar cómo la pasta de cemento en el hormigón RP88 logra teñirse con la resina fluorescente a diferencia del resto de los hormigones estudiados, lo que indicaría una mayor porosidad de la pasta de cemento.

En el hormigón de la Av. 122 de La Plata no se reconocen evidencias de la RAS pero sí se reconoce ettringita secundaria y calcita, principalmente como relleno de fisuras y cavidades de aire accidental en el hormigón de la base. Los antecedentes previos [14,22,23] y los resultados obtenidos en este trabajo indican que la fisuración del pavimento se produjo principalmente por efecto de las cargas relacionadas con el elevado tránsito en el área. Sin embargo, no se descarta la



**Figura 9.** Fotomicrografías tomadas con luz UV incidente de los hormigones (a,c,e,g) y resultado del mapeo de fisuras (b,d,f,h). a-b. AvL. c-d. RP88. e-f. 122B. g-h. 122RO.

participación del suelo de fundación en el proceso de deterioro de la estructura, ya que podría haber manifestado cambios

volumétricos, y aportado sales (sulfatos) debido al alto contenido de sodio de intercambio [20,21], durante la vida en

**Tabla 3.** Densidad de fisuras mínima y máxima, densidad promedio (mm/mm<sup>2</sup>) y desvío estándar.

Hormigón	Densidad de fisuras (mm/mm <sup>2</sup> )			
	Mínima	Máxima	Promedio*	Desvío
122RO	1,44	3,67	2,57	0,64
122B	1,10	4,11	2,45	1,06
AvL	1,65	4,91	3,57	1,06
RP88	1,07	4,73	2,82	1,26

(\*) Promedio de 10 imágenes.

servicio de la estructura. El elevado volumen de poros permeables y la fisuración del hormigón, en especial de la base, habrían favorecido el ingreso de humedad a la estructura, lo que habría desencadenado la carbonatación parcial de la pasta de cemento y la cristalización de ettringita secundaria. Esta última, podría ser, en parte, producto de una removilización interna de sulfatos en el hormigón, y/o aportados por el suelo de fundación.

Los hormigones de Mar del Plata, presentan evidencias claras del desarrollo de la RAS, sin embargo, ésta pareciera una consecuencia del ingreso de humedad a la estructura y no la causa del deterioro inicial, en especial debido al desarrollo localizado de los productos de reacción.

Los resultados obtenidos para el hormigón AvL evidencian un buen estado general. El desarrollo de productos de reacción es localizado, mientras que la ettringita sería de tipo secundaria y aparece mayormente como relleno de cavidades de aire accidental. Según datos aportados por personal de la Empresa COARCO de Mar del Plata, las zonas fisuradas en superficie corresponderían a sectores inestables de la estructura debido a la presencia de cañerías cloacales en subsuelo. Por lo tanto, el desarrollo de los productos de neoformación (ettringita y productos de la RAS) se habría producido por la circulación de agua en el hormigón a partir de fisuras estructurales, no causadas

originalmente por la RAS. Las reacciones observadas en el agregado cuarcítico se relacionan con la presencia de cuarzo microcristalino y/o fuertemente tensionado.

El hormigón RP88 presenta un mayor deterioro. El pavimento de esta ruta está fundado sobre un suelo regular a pobre, con antecedentes de sectores anegables. Esto, sumado a las cargas por tránsito, podría haber sido la causa inicial del fisuramiento en superficie. La elevada absorción y volumen de poros permeables del hormigón, así como el cuadro de fisuración en superficie, habrían favorecido la carbonatación de la pasta de cemento, la precipitación de ettringita secundaria (movilización interna de sulfatos en el hormigón o aportados por el suelo) y el desarrollo de la RAS con participación del agregado grueso cuarcítico así como de los componentes reactivos del agregado fino (rocas volcánicas con pastas vítreas). A diferencia del agregado grueso cuarcítico utilizado en la AvL, el empleado en la RP88 tiene matriz con cuarzo microcristalino y ópalo, lo que habría potenciado su reactividad en concordancia con lo observado en estudios previos de laboratorio [8-11].

## 5. Conclusiones

- Los resultados obtenidos en este trabajo (complementados con estudios previos), confirman que el deterioro sufrido por el hormigón de la Av. 122 en La Plata se

relaciona con problemas asociados a fatiga por el elevado tránsito pesado y no a reacciones deletéreas internas. Sin embargo, no se descarta la participación del suelo de fundación en el proceso de deterioro. La carbonatación y presencia de ettringita secundaria se habría producido por la circulación de humedad en la estructura, facilitada por la presencia de fisuras y, la elevada absorción y volumen de poros permeables del hormigón, en especial en la zona de la base.

- El hormigón AvL de Mar del Plata presenta un deterioro localizado, posiblemente asociado a problemas con la capacidad soporte en subsuelo. Si bien se observan algunos productos de reacción vinculados con la RAS, asociados a los agregados cuarcíticos, así como el desarrollo de ettringita secundaria en poros y fisuras, estos tienen un desarrollo local, probablemente por la baja absorción y volumen de poros permeables del hormigón, así como por su escasa fisuración y la baja reactividad del agregado cuarcítico.

- El hormigón de la RP88 en Mar del Plata presenta un mayor deterioro. La elevada absorción y volumen de poros permeables del hormigón, así como el cuadro de fisuración en superficie posiblemente asociado a la baja calidad del suelo de fundación, habrían favorecido el ingreso de humedad en la estructura con la consecuente carbonatación de la pasta de cemento, la precipitación de ettringita secundaria y un desarrollo importante de la RAS, asociada al agregado grueso cuarcítico con matriz de ópalo y calcedonia, y a la presencia de rocas volcánicas con pastas vítreas en el agregado fino. Si bien tanto el agregado grueso cuarcítico como el fino utilizado son considerados potencialmente reactivos, la RAS se produciría como respuesta secundaria de la fisuración previa de la estructura.

- Los estudios llevados a cabo para determinar las causas que llevaron al deterioro de las estructuras siguen una secuencia que va desde observaciones en obra y toma de muestras, hasta análisis

macroscópicos y microscópicos en laboratorio. La recopilación de antecedentes también es fundamental para comprender la evolución de las estructuras, aunque en muchas ocasiones esta información es escasa o se ha perdido. Los estudios de microfisuración son útiles para comprender procesos a microescala, aunque hacer extensivo estos resultados a grandes volúmenes de hormigón, depende del estudio de una gran cantidad de muestras. Finalmente, es deseable contar con resultados de ensayos in-situ (ultrasonido, permeabilidad al aire, etc.) o físico-mecánicos adicionales en laboratorio para completar el diagnóstico de las estructuras, sin embargo, esto dependerá de la disponibilidad de instrumental específico y de la posibilidad de extraer muestras apropiadas para dichos ensayos, lo que en ocasiones se dificulta debido a los trabajos de demolición de los sectores a estudiar.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al LEMIT, al CGAMA, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la prov. de Bs. As., a la Universidad Nacional del Sur y al CICTERRA (CONICET-UNC) por el apoyo brindado. También agradecen al Ing. Guillermo Álvarez por la colaboración en la obtención de muestras de hormigón en el área de Mar del Plata, y al Dr. Norberto Uriz de la FCNyM (UNLP) por la colaboración en la compaginación de las imágenes de ubicación de los hormigones muestreados.

## Referencias

- [1] Stanton, T. E. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66(10), 1781–1811.
- [2] Batic, O. R., y Sota, J. D. (2001). Reacciones deletéreas internas. En F. Irassar (Ed.), *Durabilidad del Hormigón Estructural* (pp. 157–216). AATH.
- [3] Falcone, D. D., y Batic, O. R. (2012). Estudios y antecedentes sobre la reacción álcali-silice (RAS) en el LEMIT. En Traversa, L. P. (Ed.),



*Durabilidad de las estructuras de hormigón armado* (pp. 61–80). LEMIT.

- [4] Traversa, L. P. (2012). Durabilidad de las estructuras de hormigón armado. En Traversa, L. P. (Ed.), *Durabilidad de las estructuras de hormigón armado* (pp. 61–80). LEMIT.
- [5] Dalla Salda, L., y Iñíguez Rodríguez, A. M. (1979). La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. En AGA (Ed.), *VII Congreso Geológico Argentino* (pp. 539–550). AGA.
- [6] Angelelli, V., Villa, J. R., y Suriano, J. M. (1973). Recursos minerales y rocas de aplicación de la provincia de Buenos Aires. *ANALES LEMIT*, Serie II(235), 1–195.
- [7] Coelho dos Santos, G. S., Marfil, S. A., y Maiza, P. J. (2014). Influencia de las características texturales y mineralógicas de la cuarcita Mar del Plata en su comportamiento como agregado en hormigón. En Fontana Piatti, J., Guerra, R., Leggiero, J., Patrón Costas, E., Ruggiero, M., y Carabajal, A. (Eds.), *2° Congreso Argentino de Áridos* (pp. 367–378). Cámara de La Piedra de la Prov. de Bs. As.
- [8] Coelho dos Santos, G. S., Marfil, S. A., Falcone, D. D., y Maiza, P. J. (2017). Estudio petrográfico de rocas cuarcíticas del área de Balcarce (provincia de Buenos Aires). Factibilidad de uso como agregado para hormigón. En Becaceci, S. R. et al. (Eds.), *3er Congreso Argentino de Áridos* (pp. 104–109).
- [9] Coelho dos Santos, G. S. (2018). *Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción álcali – sílice (RAS)* [Disertación doctoral, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio de la Universidad Nacional del Sur. [https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4537/Tesis%20Doctoral\\_Coelho%20dos%20Santos\\_Marzo\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4537/Tesis%20Doctoral_Coelho%20dos%20Santos_Marzo_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [10] Coelho dos Santos, G., Falcone, D., Marfil, S., y Maiza, P. (2014). Estudio de la reactividad alcalina potencial de rocas cuarcíticas de la Formación Balcarce. Relación entre los resultados de los ensayos físicos y los estudios petrográficos. En Martino, R. D., Lira, R., Guerreschi, A., Baldo, E., Franzese, J., Krohling, D., Manassero, M., Ortega, G., y Pinotti, L. (Eds.), *XIX Congreso Geológico Argentino* (pp. 1–2). Asociación Geológica Argentina.
- [11] Coelho dos Santos, G. S., Locati, F., Marfil, S., y Maiza, P. (2016). Influencia de los procesos genéticos en la reactividad de cuarcitas. Evaluación mediante ensayos acelerados. En Irassar, E. F., Rahhal, V., y Traversa, L. P. (Eds.), *VII Congreso Internacional - 21ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (pp. 381–388). AATH.
- [12] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1674. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero*.
- [13] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). *IRAM 1700. Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*.
- [14] Coelho dos Santos, G. S., Marfil, S. A., y Maiza, P. J. (2015). Petrographic evaluation of a 50-year-old concrete pavement made with quartzitic aggregate. En Yury, V. Z., Claudio, Z., Celeste, T. M. (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Sustainable Structural Concrete (Sustain Concrete 2015)* (pp. 340–348). LEMIT.
- [15] St. John, D. A., Poole, A. B., y Sims, I. (1998). *Concrete petrography. A handbook of investigative techniques* (1<sup>ra</sup> ed.). Butterworth-Heinemann.
- [16] Federal Highway Administration. (2006). *Petrographic methods of examining hardened concrete: A petrographic manual* (Report FHWA-HRT-04-150), U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/04150.pdf>
- [17] Madsen, L., Marfil, S., Locati, F., y Rocco, C. G. (2017). Determinación del grado de fisuración en prismas de hormigón utilizando microscopía UV. *Revista Hormigón*, 57, 7–14.
- [18] Madsen, L., Falcone, D., Locati, F., Marfil, S., y Rocco, C. (2018). Estudio de barras de mortero y prismas de hormigón elaborados con basaltos de la provincia de Corrientes. En Bonavetti, V. L. (Ed.), *VIII Congreso Internacional - 22ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (pp. 353–360). AATH.
- [19] Berezosky, J., Falcone, D., Locati, F., Madsen, L., y Marfil, S. (2016). Evaluación de la potencial reactividad de arenas utilizadas como agregado fino en la zona de Bahía

- Blanca, provincia de Buenos Aires. En Irassar, E. F., Rahhal, V., y Traversa, L. P. (Eds.), *VII Congreso Internacional - 21ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (pp. 389–396). AATH.
- [20] Martínez, O. R., Hurtado, M. A., y Giménez, J. E. (2006). Caracterización ambiental de los humedales costeros del Río de La Plata. Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista UnG – Geociências*, 5(1), 55–64.
- [21] Fucks, E., D'Amico, G., Pisano, M. F., y Nuccetelli, G. (2017). Evolución geomorfológica de la región del Gran La Plata y su relación con eventos catastróficos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 74(2), 141–154.
- [22] Martínez, V. (2018) *Evaluación de impacto ambiental. Prolongación de la Autopista R. Balbín (Buenos Aires – La Plata) hacia Ensenada mediante la mejora y readecuación del Camino Rivadavia (Ruta Provincial N° 13)*. [Tesis de Especialización en Ingeniería Ambiental, Universidad Tecnológica Nacional, Regional La Plata]. Repositorio Institucional Abierto. <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/3221>
- [23] Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires (2014). *Memoria descriptiva*. M.D.L.P 5. RP N° 11 Obras de Rehabilitación y conservación a ejecutar. Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. <http://www.vialidad.gba.gov.ar/licitalista/>
- [24] Zulaica, L. (2010). Metodología para la determinación de sistemas ambientales en sectores periurbanos. Mar del Plata-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(2), 269–293.
- [25] Zulaica, L., Ferraro, R., y Fabiani, L. (2009). Índices de sensibilidad ambiental en el espacio periurbano de Mar del Plata. *Graficando: Revista de Estudios Geográficos*, 5(5), 187–211.
- [26] Cuenya, B., Tella, G., Delucchi, M., y Corbalán Vieiro, L. (Comp.) (2018) *Plan de desarrollo urbano de la zona Noroeste de la ciudad de Mar del Plata*. Ediciones Azzurras.
- [27] Vásquez Varela, L. R. (2002). *Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. Ingeniería de pavimentos (Ingepav). Universidad Nacional de Colombia.
- [28] Ente Municipal de Vialidad y Alumbrado Público. (2013). *Licitación pública N° 06 / 2013: Reconstrucción total de la Avenida Libertad E/Dorrego y Av. J. H. Jara* (EXPEDIENTE N° 722 - C- 2013 – CPO. 01 – ALC. 04 - AN. 00). Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, Municipalidad de General Pueyrredón. <http://appsrv.mardelplata.gob.ar/Files/pag-web/emvial/ESPECIFICACIONES%20T%C3%89CNICAS%20LICITACION%20PUBLICA%2006-13.pdf>
- [29] Cruzate, G., Panigatti, J. L., y Moscatelli, G. (2008). *Suelos y Ambientes de Buenos Aires*. Ediciones INTA.
- [30] Ministerio de Obra Publicas de la provincia de Buenos Aires. (1964). Estado de las Obras del Plan Vial, Obras en ejecución. *Revista de la Dirección de Vialidad N° 29*.
- [31] Calo, D. (28-30 de septiembre de 2016). *100 años de los pavimentos de hormigón en Argentina. Evolución Tecnológica y Futuros Desafíos* [Presentación Plenaria]. VI Congreso Internacional y XXI Reunión Técnica de la AATH, Salta, Argentina. [https://web1.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2019/04/100\\_anios\\_de\\_pavimentos\\_de\\_hormigon\\_en\\_argentina.pdf](https://web1.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2019/04/100_anios_de_pavimentos_de_hormigon_en_argentina.pdf)
- [32] Ministerio de Obra Publicas de la provincia de Buenos Aires. (1959). Camino Mar del Plata-Necochea. Datos Técnicos. *Revista de la Dirección de Vialidad N° 8*.
- [33] American Society for Testing and Materials (2013). *ASTM C642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*.
- [34] Rasband, W. S. (1997-2018). *ImageJ* [software]. U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. <https://imagej.nih.gov/ij/>