



Pavimentos de hormigón de la ciudad de Bahía Blanca. Relación del grado de deterioro con el comportamiento hidrodinámico de la zona no saturada

Concrete pavements of the city of Bahia Blanca. Relationship between the deterioration and the hydroninamic behaviour of the unsaturated zone

Pérez Marfil, Paula¹ - Scherger, Leonardo^{1,2} - Priano, Carla³ - Lescano, Leticia^{1,2} ✉
Pera Vallejos, Guillermo^{1,2} - Lafont, Daniela^{1,2} - Lexow, Claudio^{1,2} - Marfil, Silvina^{1,2}

Recibido: 06 de junio de 2019 • Aceptado: 27 de agosto de 2019

Resumen

Se relevaron pavimentos en los diferentes ambientes geomorfológicos de la ciudad de Bahía Blanca, cubriéndose una extensión de 98 km². Se evaluó el estado de conservación de las losas y, donde fue posible, se tomaron muestras para realizar ensayos de porosidad, absorción, densidad y estudios petrográficos. Se determinó que de la superficie total el 19,2% de los pavimentos son de hormigón, 36,1% flexibles, 0,6% articulados, 0,1% empedrados y el 44% está sin pavimentar. Es frecuente observar lavado superficial, en especial en las esquinas, debido al efecto del tránsito y al inadecuado drenaje del agua de lluvia. Las principales causas de deterioro de las losas están vinculadas con fallas estructurales y falta de mantenimiento de las juntas de contracción. Por otro lado, se estudió el comportamiento hidrodinámico de la zona no saturada (ZNS) para determinar si la misma se relaciona con el estado de deterioro de los pavimentos. Se determinó que la influencia de la franja capilar (FC) sobre el contenido volumétrico del suelo superficial es nula en las zonas: peniplanicie y aluvio-coluvio y nula a mínima en el abanico aluvial. En la llanura de marea, la FC mantiene espesores medios de 70 cm en condiciones estáticas y de hasta 110 cm en periodos húmedos, vinculado a la presencia de sedimentos finos y un acuífero freático somero. Los niveles superficiales de la ZNS presentan altos contenidos de humedad durante la mayor parte del año, siendo factible la influencia de las condiciones hidrodinámicas sobre el estado de las obras viales.

Palabras claves: pavimentos, hormigón, durabilidad, zona no saturada.

Abstract

Pavements in the different geomorphological environments of the city of Bahia Blanca were surveyed. A total area of 98 km² was covered. The state of conservation of the slabs was evaluated. In the sites that were possible, samples were taken.

1. CGAMA CIC-UNS

2. Departamento de Geología UNS. San Juan 670 Bahía Blanca

3. Departamento de Ingeniería UNS. Av. Alem 1253. Bahía Blanca

✉ leticia.lescano@uns.edu.ar

At laboratory, porosity, absorption, density and petrographic studies were realized. It was determined that 19.2% of the pavements are of concrete, 36.1% flexible, 0.6% articulated, 0.1% paved and 44% are unpaved. It is common to observe washing surfaces, especially in corners, due to the traffic effect and the inadequate drainage of rainwater. The main causes of slabs deterioration are linked to structural failures and lack of contraction joints maintenance. The unsaturated zone (UZ) hydrodynamic behavior was studied to define if it is related to pavements deterioration. It was determined that capillary fringe (CF) influence on the volumetric content of the superficial soil is null in plateau and alluvial-colluvial zones and null to minimum in the alluvial fan. In the tidal plain, the CF maintains 70 cm of average thickness in static conditions and up to 110 cm in humid periods, linked to fine sediments presence and a shallow aquifer. The UZ surface levels present high humidity contents during most of the year, being possible the influence of the hydrodynamic conditions on the pavements state.

Keywords: pavements, concrete, durability, unsaturated zone.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón se ejecutan para una cierta vida útil, a pesar de ello, un gran número de obras comienzan a deteriorarse mucho tiempo antes del previsto en su diseño original. Para poder seguir prestando sus funciones, es necesario realizar intervenciones extraordinarias de mantenimiento, reparaciones y hasta reemplazos de la misma estructura o de parte de ella. Esta disminución de la vida en servicio de una obra se puede deber a la calidad de los materiales usados en el hormigón y a su ejecución, como así también a la acción combinada de diferentes agentes agresivos, factores que afectan directamente a la durabilidad de las estructuras (Priano, 2011).

En la actualidad, existen formas de garantizar que una construcción tenga continuidad a lo largo de los años, es decir que conserve requisitos mínimos de seguridad, estabilidad y funcionalidad durante su vida útil, sin costos inesperados de mantenimiento o reparación.

Algunos reglamentos han incorporado una clasificación detallada del medio de exposición en función del proceso de deterioro que puede afectar al hormigón y a las armaduras. Además, se han incluido, a modo de requisitos prestacionales, exigencias destinadas a evaluar la calidad del hormigón de recubrimiento a través de propiedades de transporte, que aportan información sobre la conectividad de la estructura porosa y del factor de retardo. Tal es el caso del reglamento CIRSOC 201 (2005), en el que se fija un valor límite para la velocidad de succión capilar de hormigones en estructuras emplazadas en ambientes con cierto tipo de exposición.

El punto más cuestionado en el diseño por durabilidad, quizás por lo difícil que resulta implementarlo en la práctica, es el referido a definir la velocidad de ingreso del agente agresivo a través del hormigón mediante modelos sencillos y accesibles que permitan inferir, con cierta fiabilidad, la vida en servicio conforme al proceso de deterioro que prevalece (Eperjesi et al., 2010).

La Instrucción del Hormigón Estructural (EHE-08, 2008), que regula el proyecto y ejecución de las estructuras de hormigón en España, define el estado límite de durabilidad como el “fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras, alcancen el grado suficiente como para impedir que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada”.

Los pavimentos de hormigón necesitan poco trabajo de mantenimiento, aunque es necesario que se realice en forma periódica y constante, de lo contrario, una pequeña falla inicial, reparable a bajo costo, se convertirá en un daño progresivo que encarecerá los trabajos de remediación. El mantenimiento consiste en el sellado de juntas, tanto de contracción como de dilatación. Esto evita que material granular no compresible se introduzca dentro de las cavidades de las juntas, generando tensiones localizadas en el hormigón cuando éstas tienden a cerrarse por dilatación (Priano, 2011). Los cambios de volumen del hormigón, originados por variaciones del contenido de humedad, constituyen una de las causas más frecuentes de fisuración de las estructuras, especialmente en los pavimentos, ya que tienen grandes superficies expuestas a la acción de la intemperie. Estas fisuras pueden alterar el comportamiento estructural y además afectan su durabilidad, ya que son vías de ingreso para sustancias agresivas (Mehta y Monteiro, 2006; Priano, 2011). El deterioro está vinculado también con la expansión térmica diferencial entre sus componentes ya que el coeficiente de dilatación térmica es mayor en la pasta cementicia que en los agregados, y varía con el contenido de humedad del hormigón y con la composición de la roca. El ataque químico al hormigón es causado por agentes externos a la estructura, que se transportan en solución hacia su interior y reaccionan con algún constituyente de la pasta cementicia (Klaric, 2001). El ingreso y la circulación de líquido se produce por permeabilidad, capilaridad o por difusión. Por lo tanto, la compacidad del hormigón es el factor más importante que gobierna la capacidad de resistir este tipo de ataque y la penetración del agua dependerá de su estructura de poros y del grado de conectividad (Priano, 2011).

La degradación del hormigón afecta no solo sus propiedades, sino que puede afectar la propia funcionalidad de la estructura y en ocasiones su aspecto estético. Si bien el deterioro es inevitable, al momento de diseñar una estructura, se deben elegir correctamente los materiales, evaluar el ambiente al que estará expuesta y establecer la vida útil. Las estructuras de hormigón se diseñan generalmente para una vida en servicio de 50 años, aunque pueden comenzar a deteriorarse a los 10 o 20 años. Las reparaciones no contempladas generan pérdidas económicas además de inconvenientes de funcionalidad. La disminución de la vida en servicio de las estructuras puede deberse a factores físicos, químicos, biológicos o mecánicos. En la mayoría de los casos nunca se presentan solos, sino son combinación de varios y, en muchas ocasiones, el deterioro producido por uno de ellos es vía de acceso a otro (Priano, 2011).

En los últimos años, se observó el deterioro prematuro de pavimentos de hormigón, emplazados en diferentes ambientes en la ciudad de Bahía Blanca. En trabajos previos se realizaron estudios en algunos sectores de la ciudad (macro y microcentro) y se concluyó que la principal causa de deterioro se debía a problemas estructurales y falta de mantenimiento de las juntas de contracción (Pérez Marfil et al., 2017; Priano et al., 2018). También se observaron patologías vinculadas a la reacción álcali-sílice (RAS) en especial en rutas de circunvalación y rotondas de acceso (Berezosky et al., 2018).

Por otro lado, Grizinić y Hirtz (2000) determinaron que en áreas urbanas, las sales presentes en la ZNS pueden generar deterioros considerables sobre las estructuras de hormigón y pavimentos. El ingreso de sales al perfil de suelo puede ser producto del riego de aguas con altos contenidos de iones disueltos o provenientes desde un acuífero hipersalino por el proceso de capilaridad. En este último caso los efectos son magnificados en presencia de un nivel freático somero, que se encuentre a escasos metros de la superficie (Scherger et al., 2019).

El subsuelo de la ciudad de Bahía Blanca presenta variaciones en sus componentes sedimentológicos, generándose diferentes comportamientos hidrodinámicos en los distintos sectores de la localidad. Las características texturales de los materiales condicionan el espesor de la franja capilar (FC) y la movilidad del agua en la zona no saturada (ZNS). La FC es una zona de transición ubicada entre el nivel freático y la ZNS. Su límite superior, muy difícil de definir, se identifica introduciendo el concepto de presión de entrada de aire en un medio poroso saturado (h_a) y su límite inferior es aquel donde la tensión matricial es $h = 0$ cm (Lexow y Bonorino, 2003).

La zona céntrica de la ciudad de Bahía Blanca se encuentra asentada sobre un abanico aluvial, comprendido entre cotas topográficas de 10 y 30 msnm. Hacia el norte se encuentra una amplia peniplanicie, cuya elevación supera escasamente los 100 msnm en la parte norte y este y que desciende suavemente hacia el oeste y sur hasta alturas no mayores a los 60 msnm. La parte terminal de esta planicie se continúa con un faldeo, comprendido entre las cotas de 10 y 60-80 msnm, que constituye un complejo coluvio-aluvio y conos aluviales coalescentes. Hacia el sur, la zona que se extiende entre las curvas de 0 y 10 msnm conforma el área litoral, correspondiente a una antigua llanura de marea, ahora emergida (Caló et al., 1999).

En determinados sectores de la localidad, la posición del nivel freático mantiene una influencia directa sobre la hidrodinámica del sistema (Lexow et al., 2017), donde el espesor de la FC queda determinado por las características litológicas y las condiciones hidrométricas. En la peniplanicie, la profundidad del acuífero se encuentra entre los 10 y los 17 m; en la zona del coluvio-aluvio y los conos aluviales, el nivel freático se localiza entre los 4 y 10 m y en la llanura de marea, se encuentra a profundidades menores de 4 m (Caló et al., 1999).

En distintos sectores de la ciudad de Bahía Blanca se han detectado problemas en los pavimentos de hormigón vinculados a las diferentes condiciones que presenta el subsuelo que conforma el área. En la zona sudoeste de la ciudad, la presencia de arcillas en superficie y la escasa profundidad del nivel freático determinan el predominio de movimientos hídricos verticales y la transferencia del agua por ascenso capilar, lo que potencia la concentración de sales por evapotranspiración (Pérez Marfil et al., 2017).

Los modelos de simulación constituyen herramientas muy valiosas a la hora de estudiar sistemas que involucran procesos

complejos e interactivos en el flujo de agua y transportes de solutos dentro de la ZNS. El código HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) es uno de los modelos más aceptados en la bibliografía en la evaluación de parámetros hidráulicos del suelo, transporte de solutos, diagramas de riego y fertilización, calidad de agua edáfica y simulación de flujos hídricos.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el estado de conservación de los pavimentos de hormigón de Bahía Blanca, considerando los cuatro ambientes geomorfológicos en los que está emplazada la ciudad. Para ello, se estudió el grado de deterioro, la relación con la composición petrográfica de los agregados gruesos y finos, el estado de las juntas de contracción y dilatación, tipo de tránsito, humedad, temperatura, contenido de sales (sulfatos, carbonatos y cloruros) y reacción álcali-sílice. Finalmente, se evaluó si existe una relación directa entre el estado de deterioro de las obras viales y las condiciones hidrodinámicas de la ZNS, para cada ambiente en particular.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área relevada de la ciudad de Bahía Blanca es de 97,8 km². Se analizaron un total de 84492 losas de hormigón, distribuidas en los 4 ambientes geomorfológicos en los que está emplazada la ciudad: llanura de marea, abanico aluvial, aluvio-coluvio y peniplanicie (Figura 1).

Se recolectaron muestras en los sitios donde fue posible. Se contó el número de placas de hormigón sanas, con fisuras longitudinales y transversales (paralelas y perpendiculares al eje del pavimento), en esquina, combinadas las dos anteriores, y en mapa. Además, se consideraron las que necesitan reemplazo debido al elevado grado de deterioro que presentan y los cortes por el tendido de servicios públicos. Las fisuras en esquina son diagonales que intersectan la junta o el borde que delimita la losa, y pueden originarse por acción de las cargas de tránsito, sobre esquinas sin soporte o por alabeo de las losas. Se determinó el tipo de agregado utilizado, se evaluó el desarrollo de fisuras por retracción, fracturas por causas estructurales o por reacciones deletéreas del tipo RAS y la presencia o ausencia de material sellador en las juntas de contracción.

Con las muestras obtenidas se realizaron ensayos de densidad, absorción y porosidad (ASTM C642-97), para lo cual se secaron a 100-110 °C durante 24 horas y se determinó el peso de la masa seca. Luego se sumergieron en agua a temperatura ambiente durante 48 horas, se secaron y pesaron para determinar la masa saturada superficie seca. Se colocaron en un recipiente con agua hasta ebullición durante 5 horas, se enfriaron hasta temperatura ambiente y nuevamente se pesaron. Para el cálculo de la masa aparente se utilizó una balanza hidrostática. La porosidad del hormigón está directamente relacionada con la posibilidad de ingreso de agua y agentes agresivos a su interior, por lo tanto es un parámetro que está estrechamente vinculado con la durabilidad de una estructura (Pérez Marfil et al., 2017).

Para el estudio petrográfico de los agregados y del hormigón se utilizó un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT y un microscopio petrográfico Leica DM 750P.

La hidrodinámica de la ZNS fue estudiada mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006). Este código, ejecutable en ambiente Windows, resuelve la ecuación de Richards para el flujo no saturado en determinada sección de estudio, según condiciones iniciales y de borde establecidas por el usuario. La ecuación de Richards modificada, que adhiere un término sumidero para incorporar la extracción

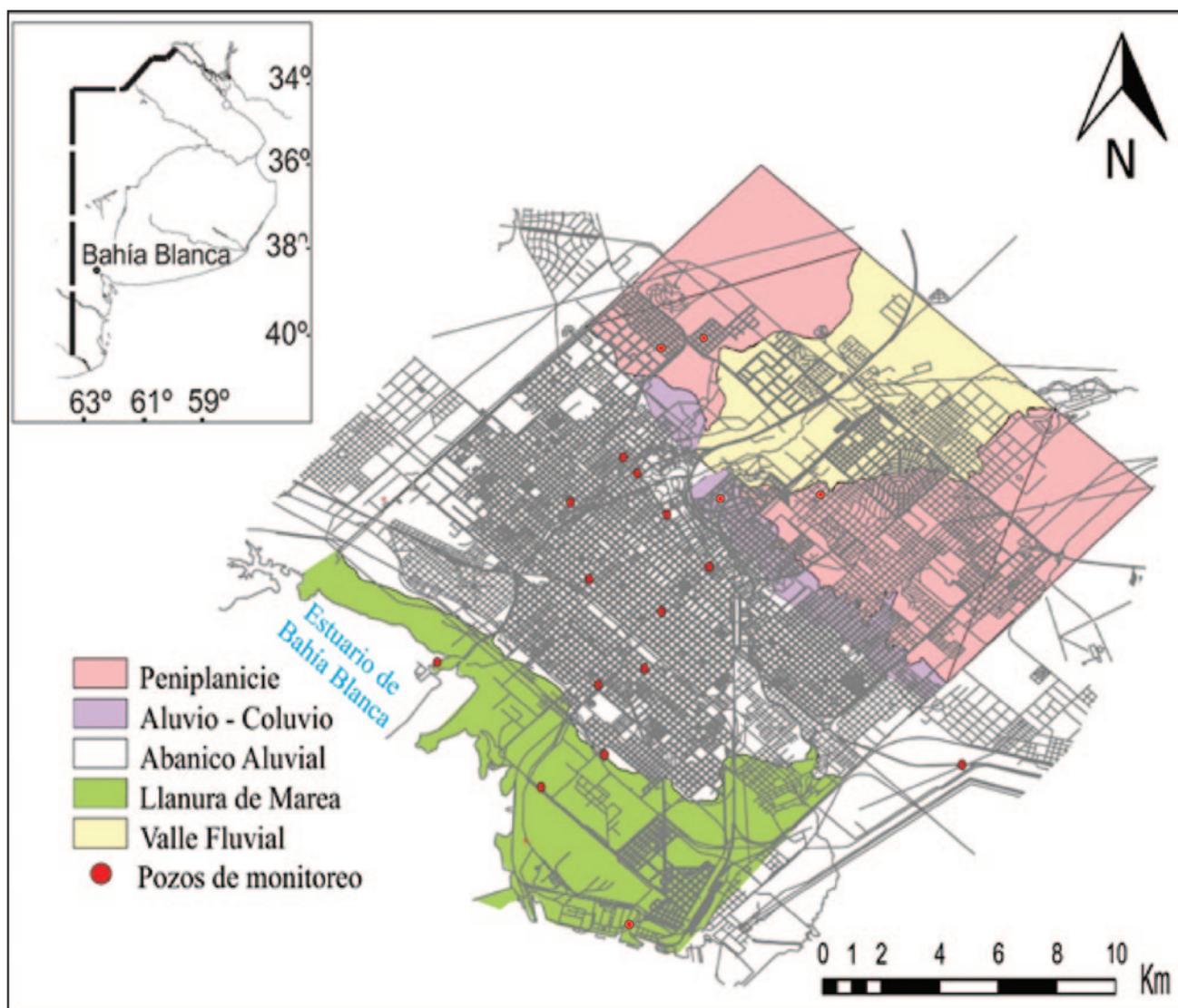


Figura 1. Plano de la ciudad de Bahía Blanca, indicando los cuatro ambientes geomorfológicos y los pozos freáticos relevados.

de agua por raíces, es resuelta mediante el método de elementos finitos. En el presente trabajo fueron evaluados cuatro perfiles no saturados correspondientes a cada sector geomorfológico de la ciudad: peniplanicie, aluvio-coluvio, abanico aluvial y llanura de marea. Las simulaciones realizadas en base a antecedentes y datos bibliográficos fueron validadas mediante la representación de condiciones similares a los valores actuales de campo.

El periodo de simulación consistió en 2555 días, iniciando el 01/01/2011 y finalizando el 31/12/2017. El modelo hidráulico elegido para la simulación fue el propuesto por *Van Genuchten*; *Mualem* (1) (*Van Genuchten, 1980; Mualem, 1976*).

$$Se = 1 + [(\alpha h)^n]^{-m} \quad (1)$$

Donde $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ es la humedad efectiva, θ es la humedad volumétrica del suelo, θ_r es la humedad residual, θ_s es la humedad de saturación, $\alpha = ha^{-1}$ es un parámetro empírico determinado por la inversa del valor tensión de entrada

de aire (ha), h corresponde a la tensión matricial y n y m , son parámetros empíricos siendo $m = 1 - 1/n$. La conductividad hidráulica (2) se estima mediante la ecuación:

$$K(Se) = K_s Se^1 \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (2)$$

Donde K_s corresponde a la conductividad hidráulica saturada y l es la conductividad de poro para la cual se sugiere un valor de 0,5 tras numerosos ensayos en varios suelos (*Mualem, 1976*).

Los parámetros hidráulicos de los materiales fueron estimados de acuerdo con datos texturales antecedentes para cada perfil (*Municipalidad de Bahía Blanca, 2016*), de acuerdo a la función de pseudotransferencia Rosetta Lite V1.1 (*Schaap et al., 2001*). Las características hidrogeológicas de cada sitio se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características hidrogeológicas de cada sector. p.n.f.: profundidad del nivel freático; θ_r : humedad residual; θ_s : humedad de saturación; $\alpha = h a^{-1}$; n: índice de distribución de poros; K_s : conductividad hidráulica saturada.

Área Geomorfológica	p.n.f (m.b.s)	Litología	θ_r	θ_s	α	n	K_s (cm/día)
Peniplanicie	≥ 15	Limos que culminan con un potente banco de tosca	0,034	0,46	0,016	1,37	6
Aluvio-Coluvio	4	Arenas finas arcillosas, bancos de tosca en niveles superiores	0,1	0,39	0,059	1,48	31,4
Abanico Aluvial	2,8	Franco limoso	0,067	0,45	0,02	1,41	10,8
		Arena fina arcillosa	0,1	0,39	0,059	1,48	31,4
Llanura de marea	1,3	Limos arcillosos	0,089	0,43	0,01	1,23	1,6

La FC corresponde a una zona de transición del sistema no saturado con el acuífero freático, donde el contenido de agua en el medio poroso es igual al de saturación y la presión de fluidos es negativa, considerando que el agua se encuentra bajo tensión (*Freeze y Cherry, 1979*). A partir de este precepto, e introduciendo el concepto de tensión de entrada de aire (h_a), se define a la FC para un medio poroso como la zona en la que el contenido de agua está próximo a la saturación $\theta \cong \theta_s$, con el agua bajo carga hidráulica negativa ($h < 0$) cuya altura hFC, para una condición hidrostática de equilibrio, está comprendida por una superficie inferior donde $h = 0$ y otra superior de tensión matricial $h = h_a$, parámetro que mantiene una relación inversa con el coeficiente hidrodinámico α .

RESULTADOS

Relevamiento del Estado de Deterioro de los Pavimentos

En la Tabla 2 se muestra la distribución del tipo de pavimento relevado por ambiente, donde se puede observar que la mayor parte de la ciudad de Bahía Blanca está emplazada en el abanico aluvial y la peniplanicie (79%). Considerando el área que ocupa cada ambiente y el tipo de pavimento en cada uno, se determinó que, de la superficie total, el 19,2% corresponde a pavimentos rígidos (hormigón), el 36,1% flexibles, el 44% son calles de tierra y un porcentaje muy bajo (<1%) son pavimentos articulados (0,6%) y empedrados (0,1%).

En la Tabla 3 se muestran los resultados del estado de conservación de los pavimentos rígidos en cada uno de los ambientes. En la Figura 2 se muestra el estado de los pavimentos en cada ambiente ponderado respecto del área total que representa en la ciudad. Si se considera la superficie que representa cada uno se puede decir que el 68% de las losas de hormigón se encuentran sanas. De las que presentan fisuras la mayoría (23%) corresponde a fisuras longitudinales y transversales. Del total de losas con deterioro el 4% necesita reemplazo.

La principal causa de deterioro de los pavimentos relevados de la ciudad de Bahía Blanca está vinculada con fallas estructurales y falta de mantenimiento de las juntas. En la Figura 3a, se observa una falla longitudinal que afecta tres placas de hormigón, con crecimiento de vegetación dentro de las fracturas. En muy pocos casos se observó levantamiento de placas por raíces de árboles. No se identificaron fallas debido a una incorrecta elección de los materiales. El estado del hormigón es bueno, no se observaron reacciones deletéreas tipo RAS a pesar de que se identificaron materiales potencialmente reactivos en el agregado fino y en el canto rodado (cuando se utilizó como agregado grueso). Los pavimentos que mejor estado presentan son los de la peniplanicie y los más deteriorados son los del abanico aluvial y aluvio-coluvio. En esta última zona es donde se registró la mayor cantidad de placas de hormigón con fisuras en esquina (Figura 3b) y daños significativos, que hace necesario su reemplazo (Figura 3d).

Tabla 2: Distribución del tipo de pavimento por ambiente.

Área Geomorfológica	Tipo de pavimento (%)					Nº de cuadras relevadas	Área (Km ²)	Área (%)
	Hormigón	Flexible	Tierra	Articulado	Empedrado			
Peniplanicie	0,8	15,9	81,7	1,6	0,0	1596	35,2	36
Aluvio-coluvio	54,9	15,2	29,8	0,1	0,0	1012	12,3	13
Abanico aluvial	22,5	63,4	14,1	0,0	0,0	3271	41,9	43
Llanura de marea	27,6	15,2	55,6	0,5	1,1	1049	8,3	8

Tabla 3. Estado de conservación de los pavimentos de hormigón

Área Geomorfológica	Estado de los pavimentos de hormigón (%)					Necesita reemplazo	Corte por servicio	Nº de placas relevadas
	Sano	Fisuras longitudinales y transversales	Fisuras en esquina	Fisuras longitudinales, transversales y en esquina	Fisuras en mapa			
Peniplanicie	86,6	6,4	4,3	0,6	0,1	0	0,4	1583
Aluvio-coluvio	56,3	36,3	4,7	1,1	0,6	6,7	2,7	9776
Abanico aluvial	58,2	35,4	4,7	1,3	0,5	6,1	4,3	61681
Llanura de marea	73,5	22,8	2,1	1,0	0,6	2,5	1,1	11452
Total ponderado por ambiente	67,9	23,4	4,0	1,0	0,4	3,6	2,4	

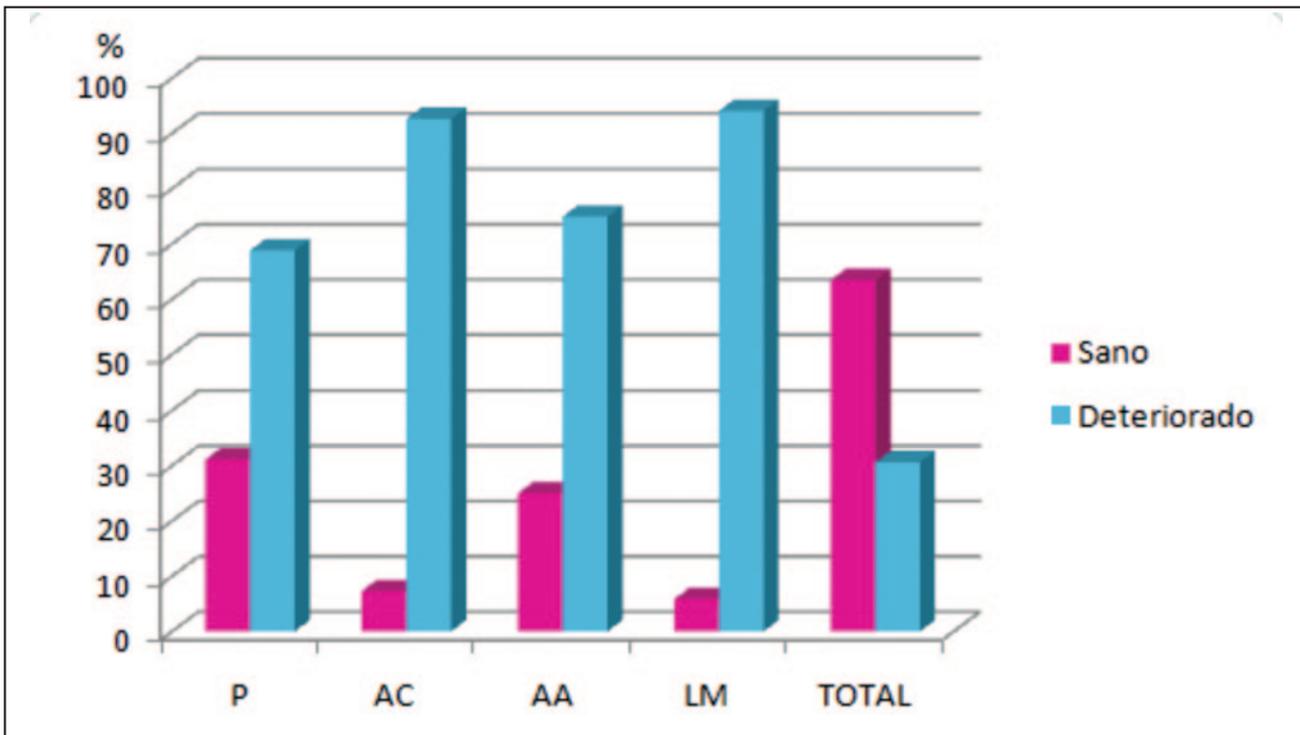


Figura 2. Estado de conservación de los pavimentos rígidos de Bahía Blanca ponderado respecto del porcentaje que ocupa cada ambiente. P: peniplanicie, AC: aluvio-coluvio, AA: abanico aluvial, LM: llanura de marea, Total: total ponderado.

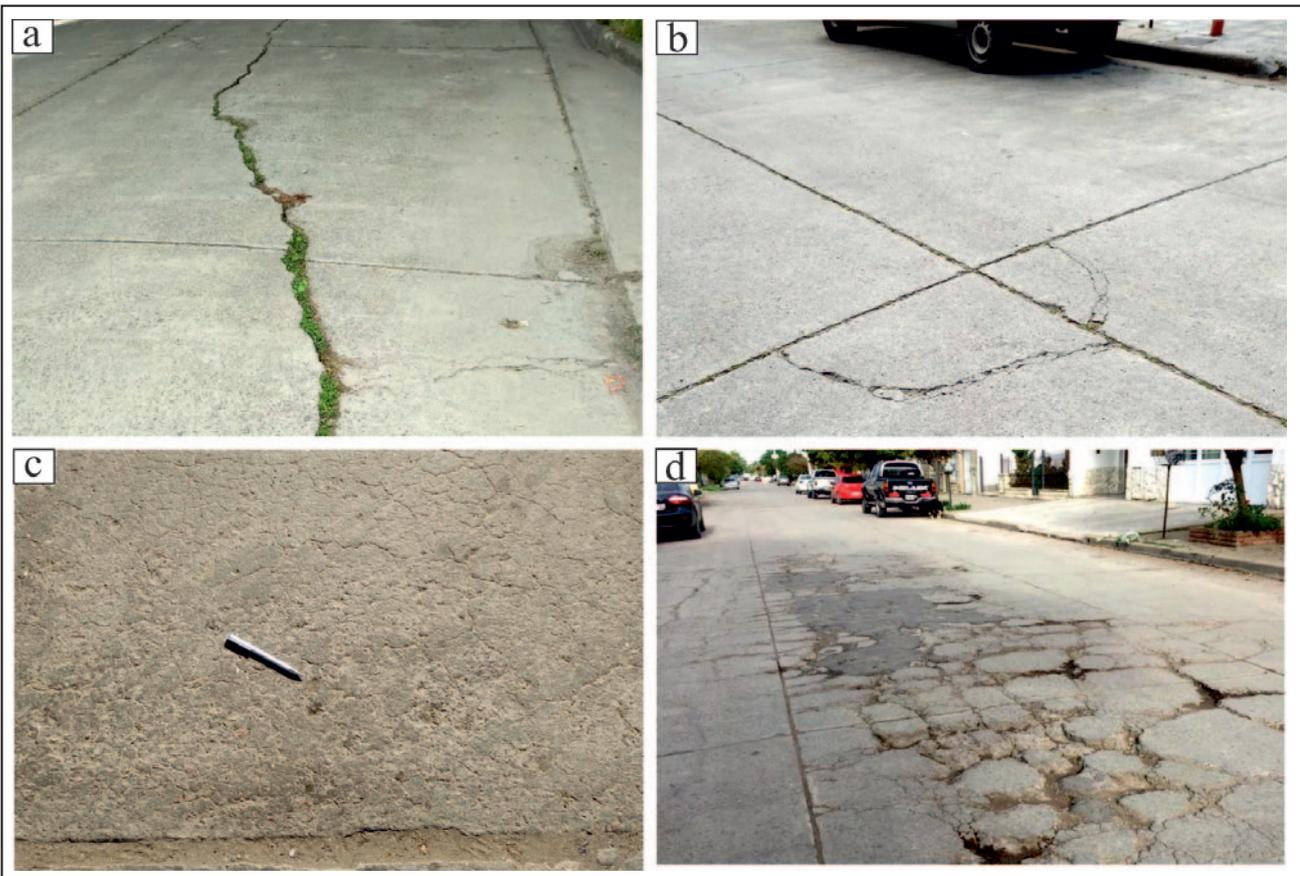


Figura 3. a) Falla estructural longitudinal, b) fisuras en esquina, c) fisuras por retracción y lavado superficial. En la parte inferior de la imagen se observa una junta sin material sellador, d) pavimento con avanzado estado de deterioro, que necesita reemplazo.

Es frecuente observar fisuras por retracción y lavado superficial (Figura 3c) en especial en las bocacalles y en las zonas de escorrentía de agua. Esto se debe al efecto abrasivo del tránsito y a un drenaje inadecuado o insuficiente del agua de lluvia que permite su acumulación sobre el pavimento.

Se observó la falta de material flexible en las juntas de contracción. La mayoría están vacías (Figura 3b, c y d) o rellenas con material granular incompresible. Los hormigones más recientes tienen las juntas aserradas, parcialmente rellenas y son los que mejor estado de conservación presentan.

Los materiales utilizados como agregados en los hormigones de los pavimentos relevados presentan una composición litológica semejante. El agregado grueso corresponde principalmente a piedra partida granítica. En muy pocos casos se identificó canto rodado polimítico y/o mezcla de ambos. En la composición del canto rodado, predominan las rocas volcánicas (andesitas, riolitas y tobas), la mayoría con pastas vítreas en general alteradas (desvitrificadas). En menor proporción se identificó cuarzo, rocas graníticas y escasas metamorfitas. El agregado fino en todos los casos es una arena natural en cuya composición predominan ampliamente las rocas volcánicas con cantidades subordinadas de rocas graníticas, valvas carbonáticas y partículas individuales de cuarzo, feldespato, vidrio volcánico, minerales opacos, y escasos piroxenos y micas.

El canto rodado y las arenas contienen más del 50% de rocas volcánicas (la mayoría de ellas con pastas vítreas). Además, en la arena es frecuente observar trizas de vidrio volcánico (entre 3% y 10%). Estos materiales son potencialmente reactivos frente a la RAS. Si bien se observaron claras evidencias de deterioro por esta patología en la rotonda de acceso de la ciudad de Bahía Blanca, no se identificaron pavimentos urbanos afectados. Esto podría deberse a que para que se desarrolle este tipo de reacción se necesitan tres factores concurrentes: agregados deletéreos, elevado contenido de álcalis y humedad.

Los valores de densidad, absorción, y porosidad obtenidos en las distintas zonas relevadas son uniformes, con valores promedio de 2,4 g/cm³, 3,1 % y 7,8 %, con un desvío estándar de 0,05, 1,2 y 3,1 respectivamente.

Comportamiento Hidrodinámico de la Zona No Saturada

La ZNS puede ser dividida en tres secciones, de acuerdo con las características del flujo no saturado y al contenido volumétrico hídrico medio del terreno. Los niveles superiores del suelo se encuentran sujetos a los fenómenos meteorológicos externos, representados por eventos sucesivos de humedecimiento (efecto de la precipitación) y desecación (efecto de la evapotranspiración). Esta zona denominada zona de evapotranspiración (Z EVT), es donde se generan los cambios de contenido de humedad más significativos. Predominan los movimientos de agua verticales ascendentes, debido a la acción conjunta de la extracción por las raíces de las plantas y la evaporación del agua del suelo para cubrir la necesidad atmosférica de humedad. El agua que no es evapotranspirada, y percola hacia niveles inferiores llega a la zona intermedia (ZI) de la ZNS, donde se mantiene en los poros bajo tensión capilar. Aquí los movimientos hídricos verticales pueden ser ascendentes o descendentes, de acuerdo a las condiciones hidrodinámicas preponderantes, dominadas por gradientes matriciales o gravitacionales respectivamente. Las variaciones del contenido volumétrico en esta zona son menores que en la capa superior. El nivel inferior de la ZNS se constituye por la FC, en contacto inferior con el nivel freático.

Aquí los contenidos de humedad son iguales o próximos a saturación, y el agua se mantiene en los poros del terreno por succión capilar. Las simulaciones realizadas para cada perfil permiten distinguir el comportamiento del flujo hídrico no saturado bajo gradientes naturales. Resulta fundamental evaluar el comportamiento de la FC para cada ambiente geomorfológico en particular, dado que el contacto de dicha zona con las estructuras de hormigón y pavimentos, puede ser un disparador del deterioro prematuro.

En la Figura 4 se muestran los perfiles esquemáticos de suelo simulados en cada uno de los ambientes geomorfológicos, indicándose los contenidos de humedad típicos para una de las capas de la ZNS. La peniplanicie se desarrolla desde cotas mayores a 60 msnm. El subsuelo en esta área se compone de limos loésicos de gran espesor, que culminan en su parte superior con un espeso manto de tosca. En algunos sectores, la capa de tosca se encuentra erodada, estando el suelo enmarcado en los sedimentos limosos, o presenta fracturaciones y/o discontinuidades que permiten el flujo de humedad hacia las zonas profundas del perfil. El nivel freático en este ambiente se encuentra a profundidades variables de entre 15 a 30 m hacia el sector norte, por lo que, a modo de evaluar el escenario de mayor peligrosidad para las estructuras viales, se consideró el mínimo espesor saturado en el modelo de flujo. A partir de las condiciones hidrodinámicas simuladas se distingue que la influencia de la evapotranspiración se centra en los 40 cm superiores del suelo, ocupando la zona intermedia espesores de hasta 14 metros. La FC mantiene espesores entre 62 y 65 cm por encima del nivel freático, con contenidos de humedad comprendidos entre 0,38 cm³/cm³ a 0,46 cm³/cm³, humedad de saturación (Figura 4 b).

El área de aluvio-columpio se ubica sobre el faldeo sur de la peniplanicie, como una banda de dirección noroeste-sudeste, de aproximadamente 2 km de ancho, entre las cotas de 30 y 60 msnm. La ZNS se compone en general, de arenas con matriz arcillosa, que en su parte superior puede presentar niveles de tosca discontinuos. La Z EVT puede alcanzar la base de los niveles cementados, ocupando los 60 cm iniciales del suelo. La ZI presenta contenidos volumétricos entre 0,22 cm³/cm³ y 0,32 cm³/cm³, con un espesor medio de 3,2 m. La FC ocupa un espesor mínimo de hasta 20 cm, con contenidos de humedad entre 0,32 cm³/cm³ a 0,39 cm³/cm³ (Figura 4a). La textura arenosa del suelo se vincula al coeficiente α , de 0,059, equivalente a un valor bajo de presión de entrada de aire, $h_a = -16,95$ cm.

El área del abanico aluvial se ubica en el sector central de la localidad, entre las cotas de 10 y 30 msnm. El perfil analizado se compone de 2 m de sedimentos franco-limosos que suprayacen a 80 cm de arenas arcillosas. La Z EVT, donde ocurren los cambios más extremos de humedad se aloja hasta los 40 cm de profundidad. Siendo arenas arcillosas, los sedimentos que contienen al acuífero freático en su porción superior, de manera similar que, en el caso anterior, la FC mantiene espesores mínimos entre 16 y 18 cm, con contenidos volumétricos entre 0,33 cm³/cm³ y 0,39 cm³/cm³ (Figura 4d).

La llanura de marea se ubica por debajo de la cota de 10 msnm, y se caracteriza por la presencia de sedimentos finos y un acuífero freático somero, con profundidades medias de 1,3 m. El perfil analizado se compone de limos arcillosos, que presentan un valor de α estimado de 0,01 y se corresponde a un valor de presión de entrada de aire relativamente alto, $h_a = -100$ cm. Los limos arcillosos que componen la ZNS favorecen el ascenso de humedad desde el acuífero por capilaridad. La FC presenta espesores medios de 70 cm en condiciones estáticas y

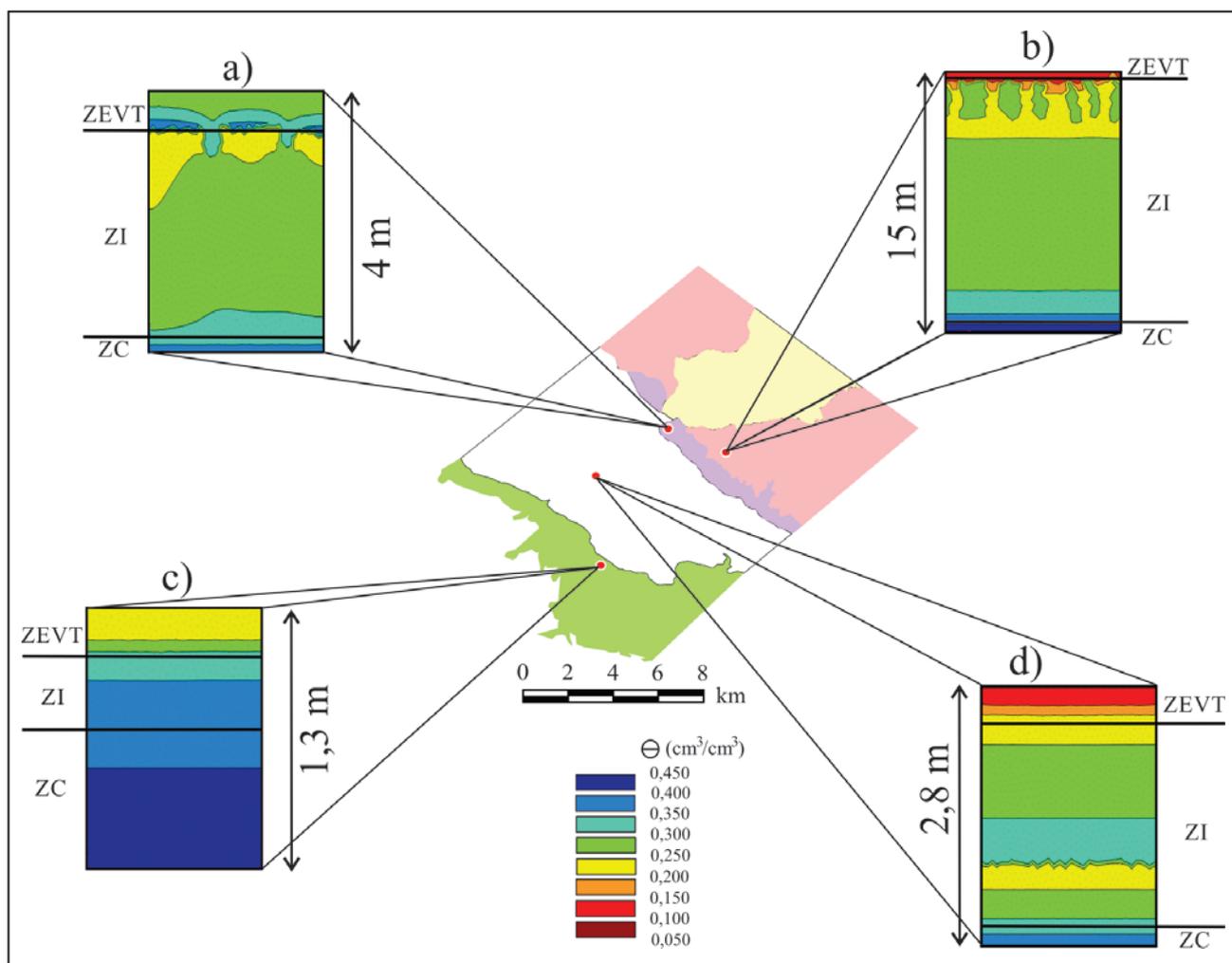


Figura 4. Perfil esquemático de la ZNS de cada ambiente geomorfológico. a) aluvio-coluvio, b) peniplanicie, c) llanura de marea, d) abanico aluvial. Donde θ : humedad volumétrica, ZEVT: zona de evapotranspiración, ZI: zona intermedia y ZC: zona capilar.

de hasta 110 cm durante periodos húmedos, con contenidos volumétricos entre $0,38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $0,43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. La FC mantiene una relación directa con la hidrodinámica, regulando los flujos hídricos en el perfil no saturado (Figura 4c). Los niveles superficiales del suelo presentan contenidos de humedad elevados durante todo el año, entre $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $0,37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y condiciones de saturación parcial en épocas de gran pluviometría, efecto vinculado a la baja permeabilidad vertical de este tipo de sedimentos.

DISCUSIÓN

La caracterización de la franja capilar cumple un rol fundamental en la planificación urbana. Este sector del sistema no saturado es capaz de ejercer influencia sobre los contenidos de humedad de los niveles superiores del suelo, afectando negativamente las construcciones en superficie (Scherger y Lexow, 2018). En base a las simulaciones realizadas mediante el software HYDRUS 2D/3D, se puede determinar que no existe relación en los contenidos volumétricos de humedad de los niveles superficiales del suelo y la posición de la FC, para los ambientes de peniplanicie, aluvio-coluvio y abanico aluvial. En el caso de la peniplanicie, aunque los sedimentos limosos presentan una

FC de hasta 65 cm, la profundidad del nivel freático ($> 15 \text{ m}$) implica una influencia nula, ocupando la ZI la mayor porción del perfil no saturado. Para las zonas de aluvio-coluvio y abanico aluvial, la ZNS presenta espesores promedio de 4 m y 2,8 m, respectivamente, siendo la porción del acuífero contenida en sedimentos arenosos. Estas texturas se caracterizan por presentar altos valores relativos del coeficiente α , generándose espesores mínimos para la FC por su baja capacidad de retención (Kutilek y Nielsen, 1994). El ambiente de llanura de marea se caracteriza por la presencia de sedimentos finos y un acuífero freático somero, características que favorecen los movimientos de agua verticales (evaporación, transpiración y recarga) sobre el flujo lateral, generando un mayor tiempo de contacto agua-sedimento-hormigón. En este contexto, se determinó que la FC ocupa espesores medios de hasta 70 cm en condiciones estáticas, permitiendo el ascenso capilar de humedad hasta los niveles superficiales del suelo. En esta zona, los posibles efectos de las condiciones hidrodinámicas son agravados por las características salinas del acuífero costero (Lexow et al., 2018). La acumulación de sales por ascenso capilar y evapotranspiración de la humedad genera un grave peligro para las estructuras de superficie, dada la alteración de las sales solubles sobre los agregados pétreos.

Las sales pueden movilizarse dentro de los poros del material, y si ocurre evaporación pueden precipitar generando deformidades estructurales (Graham, 2005). Las reacciones químicas se manifiestan a través de efectos físicos nocivos tales como el aumento de la porosidad y permeabilidad, disminución de la resistencia, fisuración y delaminación (Oshiro et al., 2008).

El 73,5% de los pavimentos de hormigón relevados en el ambiente de llanura de marea se encuentra sano. Éstos están ubicados en la zona del puerto de Ing. White, donde se encontraron pavimentos con muy avanzado estado de deterioro (para reemplazo) en las calles internas y un excelente estado en la avenida de acceso (recientemente repavimentada) que ocupa la mayor parte del área relevada, lo que hace que el porcentaje de sanos sea elevado. Considerando que el 56% de las calles dentro de este ambiente son de tierra, al momento de diseñar un pavimento rígido, debería tenerse en cuenta la influencia de la franja capilar determinada en este trabajo.

CONCLUSIONES

Del total del área relevada el 68% de las losas de hormigón se encuentran sanas. De las que presentan deterioro la mayoría (23%) se debe a fallas estructurales, con presencia de fisuras longitudinales y transversales. Del total de las losas con deterioro el 4% necesita reemplazo.

Los valores de densidad medidos en el hormigón son uniformes y los de porosidad y absorción bajos (menores a 10% y 5%, respectivamente). Existe una correlación entre estos últimos, sin embargo, no se observó relación entre estos parámetros y el grado de deterioro.

Las simulaciones en el software HYDRUS 2D/3D permiten establecer que únicamente en el área de llanura de marea, la FC ejerce una influencia directa sobre los flujos hídricos verticales

en la ZNS. La FC ocupa espesores de 70 cm en condiciones estáticas y de hasta 110 cm en periodos lluviosos, permitiendo que los niveles superficiales del suelo presenten contenidos de humedad elevados durante la mayor parte del año. En estos sectores será fundamental establecer los efectos de las condiciones hidrológicas del suelo sobre las estructuras de pavimentos de hormigón. En el resto de los ambientes geomorfológicos de la ciudad de Bahía Blanca, se establece que la influencia de la FC sobre el contenido volumétrico del suelo superficial es nula en las zonas de peniplanicie y aluvio-colvio y nula a mínima en el sector de abanico aluvial, descartándose de esta manera su influencia como causa del deterioro prematuro del pavimento.

La llanura de marea representa el 8% del total del área de la ciudad de Bahía Blanca, en la cual el 27,6% de los pavimentos son de hormigón lo que representa 2,3 km². Considerando que el 56% de las calles en este ambiente son de tierra los resultados obtenidos en el presente trabajo deberían ser considerados en la planificación del pavimentado.

La principal causa de deterioro de los pavimentos relevados de la ciudad de Bahía Blanca está vinculada con fallas estructurales y falta de mantenimiento de las juntas de contracción. La mayoría están vacías o rellenas con material granular incompresible. No se evidenció una relación entre el grado de deterioro y el comportamiento hidrodinámico de la franja capilar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CGAMA, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la prov. de Bs. As. y a la Universidad Nacional del Sur por el apoyo brindado. Este trabajo fue financiado por la CIC con un proyecto en el marco del programa de fortalecimiento de Centros.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BEREZOSKY, J., MARFIL, S. Y DI SCIULLO, N. (2018). Evaluación del deterioro de pavimentos de hormigón de rutas interurbanas de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires). *VIII Congreso Internacional, 22ª Reunión Técnica de la AATH, Olavarría, 449-456.*
- CALÓ, J., FERNÁNDEZ, E., MARCOS, A. Y ALDACOUR, H. (1999). Construcciones de mapas geológicos-ingenieriles a partir de conocimientos previos compilados en un sistema de información geográfica. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente (ASAGAI), 13: 1-10.*
- EHE-08 (2008). Instrucción del hormigón estructural. *Suplemento del Boletín Oficial del Estado N° 203, España, 304 p.*
- EPERJESI, L., FERREIRA HIRSCHIY, E. Y VICENTE, A. (2010). Avances en la normalización de la resistencia a la carbonatación de estructuras de hormigón armado. *I Congreso Hormigón Premezclado de las Américas 2010, XII Congreso Iberoamericano del Hormigón Premezclado, IV Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón y 18ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Mar del Plata, 8 p.*
- CIRSOC 201 (2005). Reglamento argentino de estructuras de hormigón. *Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), del Sistema INTI, 482p.*
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J.A. (1979). Groundwater. *Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 553p.*

- GRAHAM, T. (2005).
On the road to better management: An investigation into the benefits of managing the impacts of dryland salinity on roads.
Proceeding of the 49th Conference of Australian Agricultural and Resource Economics Society, 20p.
- GRIZINIK, M. Y HIRTZ, N. (2000).
Salinización en el ejido urbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. Evaluación y Propuesta de Saneamiento.
I Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas. São Paulo: ABAS, 17p.
- KLARIC, M.(2001).
Fisuración y ataques físicos al hormigón.
En Irassar, E.F. (Ed). Durabilidad del hormigón estructural. Argentina. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón: 47-95.
- KUTILEK, M. & NIELSEN, D. R. (1994).
Soilhydrology.
Catenaverlag, cremlingen-destedt, Alemania, 370p.
- LEXOW, C. Y BONORINO, A.G. (2003).
Definición de la franja capilar en un acuífero freático loésico somero.
III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea, vol.I, 179-187.
- LEXOW, C., PERA VALLEJOS, G. Y BAUER, E. (2017).
Comportamiento de la franja capilar en el sector oeste de la ciudad de Bahía Blanca.
XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán. Sección técnica 15, 65-66.
- LEXOW, C., SCHERGER, L. PERA VALLEJOS, G. Y BAUER, E. (2018).
Movilidad de sales por ascenso capilar a partir del acuífero freático en el sector sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente (ASAGAI), 41:23-31.
- MEHTA, P.K. & MONTEIRO, P.J.(2006).
Concrete. Microstructure, Properties, and Materials
(3ªed.) New York, EEUU. McGraw-Hill, 659 p.
- MUALEM, Y. (1976).
A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.
WaterResourcesResearch 12(3): 513-522.
- MUNICIPALIDAD DE BAHÍA BLANCA. (2016).
Subsecretaría de Gestión Ambiental, Área de Auditoría, Registros Ordenanza Municipal 10787.
- PÉREZ MARFIL P., BAUER, E., LESCANO, L., PERA VALLEJOS, G., PRIANO, C., BEREZOSKY, J. J., LEXOW C. Y MARFIL, S. (2017).
Causas del deterioro prematuro de pavimentos de hormigón de la ciudad de Bahía Blanca y rutas de acceso.
Su relación con la franja capilar. IV Cong. Internacional de la provincia de Bs. As. Quilmes, 1 p.
- PRIANO, C. (2011).
Evaluación del estado de conservación de los hormigones en ambientes urbanos, rurales y marinos de la ciudad de Bahía Blanca y su zona de influencia.
Tesis doctoral (inédita). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 289p.
- PRIANO, C., PÉREZ MARFIL, P., LESCANO, L. Y MARFIL, S. (2018).
Estudio estadístico del estado de conservación de pavimentos de hormigón del sector SE de Bahía Blanca (Buenos Aires).
VIII Congreso Internacional, 22ª Reunión Técnica de la AATH, Olavarría, 327-334.
- OSHIRO, A., BARONETTO, C., BELTRAMONE, C. Y POSITIERI, M. (2008).
Comportamiento de hormigones expuestos a condiciones naturales de alta agresividad química.
Exacta, 1: 93-108.
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J. & VAN GENUCHTEN, M. TH. (2001).
Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions.
Journal of Hydrology, 251(3-4): 163-176.
- SCHERGER, L. E. Y LEXOW, C. (2018).
Impacto de la franja capilar en el área urbana de Bahía Blanca.
XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y X Congreso Argentino de Hidrogeología. Vol.: Acuíferos Transfronterizos/El agua subterránea y las Ciudades/ Planificación y Gestión, 89-96.
- SCHERGER, L. E., LEXOW, C., ZANELLO, V. Y CARBAJO GASTOLDI, M. (2019).
Salinización de suelos de textura fina por ascenso capilar a partir del acuífero freático hipersalino somero (Bahía Blanca, Argentina).
Águas Subterráneas, 33(2): 159-170.

SIMUNEK J., SEJNA, M. & VAN GENUCHTEN, M. T. (2006).

The HYDRUS (2D/3D).

Software Package for Simulating the Two- and Three Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably Saturated Media. Version 1.0. Praga, República Checa: PC Progress.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980).

A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.

Soil Science Society of American Journal, 44(3): 892-898.