



CUARTO CONGRESO INTERNACIONAL
CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO
DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

CAUSAS DEL DETERIORO PREMATURO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN DE LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA Y RUTAS DE ACCESO. SU RELACIÓN CON LA FRANJA CAPILAR

Centro de Geología Aplicada, Agua
y Medio Ambiente (CGAMA)

CAUSAS DEL DETERIORO PREMATURO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN DE LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA Y RUTAS DE ACCESO. SU RELACIÓN CON LA FRANJA CAPILAR

P. Pérez Marfil, E. Bauer, L. Lescano, G. Pera Vallejos, C. Priano, J. J. Berezosky, C. Lexow, S. Marfil*

Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA)
smarfil@uns.edu.ar

RESUMEN

Se estudiaron pavimentos de hormigón de la ciudad de Bahía Blanca y de una rotonda de acceso, con el propósito de evaluar el estado de conservación y determinar las causas de deterioro. El área relevada abarca 33 km². Se analizó el estado de las losas (fallas estructurales, superficies de abrasión, fracturas y deterioro por la reacción álcali-sílice) y el tipo de agregado (fino y grueso).

Se tomaron muestras para determinar porosidad, abrasión, densidad y para realizar estudios petrográficos de los agregados y del hormigón. Se realizó un estudio estadístico sobre las 15 776 losas relevadas y se concluyó que el 48% presenta deterioro. El 47% se debe a fallas estructurales, y de estas, el 14% necesita reemplazo total. Es frecuente observar lavado superficial, en especial en las esquinas. Esto se debe al efecto del tránsito y al inadecuado drenaje del agua de lluvia que se acumula sobre el pavimento.

Por otra parte, se evaluó el comportamiento hidrodinámico de la zona no saturada (ZNS) de un sector de la ciudad, haciendo especial énfasis en la franja capilar en un terreno limo arcilloso, mediante modelación numérica, y se compararon los resultados con mediciones directas. El área está caracterizada por un nivel freático somero y aguas de elevado tenor salino. Se observó que la franja capilar se moviliza masivamente junto a las fluctuaciones del nivel con una altura capilar de 123 cm. Los resultados obtenidos indican que existe una influencia hidrodinámica en los niveles superiores de la ZNS.

Palabras clave: pavimentos, hormigón, zona no saturada, Bahía Blanca.

*paulaperezmarfil@gmail.com, leticia.lescano@uns.edu.ar, lexow@uns.edu.ar, guillermo.vallejos@uns.edu.ar, cpriano@uns.edu.ar, juanjob22@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Todos los materiales se degradan en contacto con el medio ambiente y evolucionan hacia formas más estables. Esto produce la degradación del hormigón, afectando no solo sus propiedades sino también la propia funcionalidad de la estructura y en ocasiones su aspecto estético. Al diseñar una estructura, se deben elegir los materiales, evaluar el ambiente en el que estará expuesta y establecer *a priori* la vida útil, es decir, el tiempo durante el cual la obra deberá mantener su seguridad estructural, su aptitud en servicio y sus aspectos estéticos, sin necesidad de gastos de mantenimiento no previstos. La problemática geológica ambiental que genera el entorno natural en las obras de hormigón no solo depende del tipo de formación geológica que le da soporte sino también de la presencia de una capa freática somera. La valoración de este impacto es de significativa importancia a fin de lograr medidas estructurales tendientes a mitigar los efectos nocivos.

La ciudad de Bahía Blanca está construida en ambientes geológicos muy diferentes. La zona céntrica está asentada sobre un abanico aluvial, entre cotas topográficas de 5 a 25 metros, mientras que hacia el sur se extiende a un ambiente de llanura de marea emergida con alturas topográficas menores a 5 metros y hacia el norte a una peniplanicie que detenta las mayores alturas de la zona, alcanzando 70 ms. n. m. Cada una de esas unidades geomorfológicas está relacionada a sedimentos característicos. La peniplanicie pedemontana que se extiende hacia el noreste a partir de la curva de 60 m está conformada por sedimentos de tipo loessoides, con presencia de carbonato de calcio reconocido como "tosca". La parte terminal de esta planicie se continúa con una zona de faldeo entre las cotas de 20 y 60 m constituida por un complejo coluvio-aluvio y conos aluviales coalescentes. En el oeste de esta zona, los conos aluviales originados por acción fluvial son de gran extensión y su coalescencia hace que topográficamente se presenten como llanuras aluviales (Caló *et al.*, 1999).

Las estructuras de hormigón se proyectan para mantener requisitos mínimos de seguridad, estabilidad y funcionalidad, durante su vida útil, sin costos extraordinarios de mantenimiento o de reparación. Sin embargo, si se produce algún mecanismo de ataque al hormigón (físico, químico o biológico o una combinación de ellos), el deterioro irá en aumento hasta sobrepasar un nivel de seguridad o de funcionalidad definidos en el proyecto original, por lo que será necesario reparar la estructura. Los requisitos de durabilidad que se deben exigir son de igual importancia que los de resistencia.

Un factor importante para considerar en relación con las tensiones de la losa y con la durabilidad del pavimento es el diseño de las juntas en lo relativo a su espaciamiento, tipo y dimensiones. Los pavimentos de hormigón bien proyectados y construidos necesitan poco trabajo de mantenimiento, pero es imprescindible que este 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, fundamentalmente, 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 estas tienden a cerrarse por dilatación (Priano, 2011).

Los cambios de volumen del hormigón, originados por variaciones de su contenido de humedad, constituyen una de las causas más frecuentes de fisuración de las estructuras, especialmente de aquellas que, como los pavimentos, 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 al hormigón (Mehta y Monteiro, 2006; Priano, 2011).

El deterioro está íntimamente relacionado con la expansión térmica diferencial entre sus componentes que producen altas tensiones internas. El coeficiente de dilatación térmica es sustancialmente mayor en la pasta cementícea que en los agregados, y, además, varía significativamente con el contenido de humedad del hormigón y con la composición mineralógica de la roca (Klaric, 2001).

La resistencia del hormigón a la abrasión depende fundamentalmente de las características de la pasta, de los agregados, en especial los gruesos, y de la adherencia entre ellos (Priano, 2011). El ataque químico al hormigón es un proceso de degradación causado por agentes agresivos provenientes del ambiente externo a la estructura, que se transportan en solución hacia su interior y reaccionan con algún constituyente de la pasta cementícea. Para que se produzca, es necesario la presencia de agua en el medio ambiente y un mecanismo de transporte de los agentes agresivos hacia el interior de la pasta de cemento (Irassar, 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 su grado de conectividad (Priano, 2011). El ion sulfato puede estar presente en las aguas residuales industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico. Los sulfatos perjudiciales para el hormigón se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en la capa freática (Irassar, 2001).

Existen agregados constituidos por rocas o minerales, capaces de reaccionar con los álcalis solubles en el hormigón produciendo expansiones y agrietamientos en las estructuras de hormigón. Debido a que el deterioro que produce este tipo de reacciones es lento, el riesgo de fallas catastróficas es muy bajo, aunque se generan problemas de servicio y se pueden exacerbar otros mecanismos de deterioro. Stanton (1940) fue el primero en observar esta patología en estructuras en California donde, en presencia de humedad permanente, se originaba una reacción entre los álcalis del cemento y algunos componentes de los agregados, a consecuencia de la cual se producía un incremento de volumen que fisuraba el hormigón. Comprobó que la reacción se producía en forma más intensa cuando se usaban agregados con sílice criptocristalina. Esta reacción se conoce como álcali-sílice (RAS). Para que se desarrolle, es necesario la concurrencia de tres factores: agregados potencialmente reactivos, elevado contenido de álcalis y humedad relativa superior al 80%. Los agregados potencialmente reactivos pueden producir reacciones de tipo lentas/diferidas si la tasa de reacción es baja (vinculada con el cuarzo tensionado o microcristalino) o reacciones rápidas cuando el agregado

contiene variedades de sílice criptocristalina (ópalo, tridimita, cristobalita, calcedonia) o vidrio volcánico.

En los últimos años se observaron, en la zona de Bahía Blanca, pavimentos de hormigón con evidencias de deterioro debido al desarrollo de la reacción álcali-sílice, a malas prácticas constructivas, a la elección errónea de materiales, a proyectos que no se adecuan a las características del tránsito o por cambios producidos en intensidad y frecuencia de la circulación, que produjeron desfasajes generando solicitaciones no previstas. En otros casos, debido a una geología de superficie heterogénea (zonas bajas donde el nivel freático está muy cerca de la superficie con aguas salobres, contenido variable de materiales arcillosos, zonas de transición de porosidad y litologías diferentes, etc.).

Las características texturales de los sedimentos condicionan el espesor de la franja capilar como así también la movilidad del agua en la zona no saturada (ZNS). La franja capilar es una zona de transición ubicada entre el nivel freático y la zona no saturada, cuyo límite superior es muy difícil de definir, sobre todo por estar afectado por histéresis. Dicho límite se identifica introduciendo el concepto de presión de entrada de aire en un medio poroso saturado h_a . Hidrodinámicamente se la define como una capa limitada entre una superficie inferior donde la tensión matricial es $h = 0$ cm y una superior donde la tensión matricial es esh_a (Lexow y Bonorino, 2005). Las variaciones del contenido de humedad en suelos de naturaleza pelítica, como consecuencia de la infiltración de agua de lluvia y de la evapotranspiración, provocan importantes procesos de expansión y contracción principalmente en aquellos niveles con predominio de arcillas montmorilloníticas. Este fenómeno natural ha sido indicado como la causa de asentamientos diferenciales del suelo e inestabilidad en las cimentaciones cuyas manifestaciones son agrietamientos y roturas de estructuras que no fueron diseñadas para este tipo de terrenos. En la planicie de Bahía Blanca, la profundidad del acuífero se encuentra entre los 10 y los 17 metros. En la zona del coluvio-aluvio y los conos aluviales, el nivel freático se localiza entre los 4 y 10 metros de profundidad. En tanto que en la llanura de inundación, se encuentra a profundidades menores de 4 metros (Caló *et al.*, 1999).

En trabajos previos se estudiaron pavimentos de hormigón de la zona de Bahía Blanca, en los que se concluyó que el deterioro estaba vinculado a una suma de procesos que actuaron durante un largo período de tiempo. Es probable que la rotura se haya iniciado por fallas constructivas e incluso de proyecto, como podría ser el curado defectuoso. El ingreso de agua a través de las fisuras pudo ser el factor desencadenante para el desarrollo de la reacción álcali-sílice (Maiza y Marfil, 2003; Marfil y Maiza, 2000; Marfil *et al.*, 2001a y 2001b). En algunos casos el factor climático parece haber jugado un rol importante. La elevada humedad y permeabilidad creciente de las losas ante la fisuración, roturas, juntas con conservación deficientes y otros factores, incrementa los procesos de deterioro. Esta condición alternada con períodos de sequía posiblemente contribuya en la movilización de iones a través de la solución de poro para que reaccionen con los agregados reactivos y con los materiales cementantes del hormigón, generando productos de neoformación en cavidades y fisuras (Priano *et al.*, 2006 y 2009; Priano y Marfil, 2009). Por lo tanto, la durabilidad de las estructuras de hormigón sin dudas dependerá de numerosas variables entre las que pueden mencionarse: la presencia de

especies mineralógicas deletéreas que componen los agregados, los productos de reacción formados a expensas de las reacciones de intercambio entre agregado, cemento y agua, el tiempo, la temperatura y las condiciones fisicoquímicas y ambientales.

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 oeste 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.

En el presente trabajo se realizó un relevamiento y muestreo de pavimentos de hormigón de una rotonda de acceso a la ciudad de Bahía Blanca y del sector urbano, delimitado por el canal Maldonado y las vías del ferrocarril. Incluye el macro y microcentro y los barrios Pedro Pico, Universitario, Pacífico, Almafuerde, Km 5 y Napostá. Además se evaluó el comportamiento hidrodinámico de la zona no saturada, haciendo especial énfasis en la franja capilar, en un terreno limo arcilloso mediante modelación numérica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área relevada de la ciudad de Bahía Blanca cubre un total de 1146 cuadras y un área de 33 km² de la cual, sólo el 18,7 % es pavimento rígido, el resto está constituido por pavimento flexible. Se evaluaron 15776 losas de hormigón, y se tomaron muestras de las afectadas por problemas estructurales en los casos donde fue posible. Además se tomaron muestras de una rotonda de acceso a la ciudad sobre la ruta nacional N° 33. Este hormigón se construyó en el año 1994 y fue reparado en el año 2009 y presenta avanzado estado de deterioro.

Con las muestras obtenidas se realizaron ensayos de densidad, absorción y porosidad, según lo establecido en la norma ASTM C642-97 y estudios petrográficos con un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT y un microscopio petrográfico Olympus trinocular BH-2 para el estudio de la composición de los agregados finos y gruesos (IRAM 1649), el estado del mortero y el desarrollo de microfisuras, coronas y productos de reacción.

Se contó el número de placas de hormigón sanas, con fallas estructurales y cortes por el tendido de servicios públicos, considerando las que necesitan reemplazo debido al avanzado estado de deterioro. Se evaluó la presencia de fisuras y grietas, tanto longitudinales (paralelas al eje del pavimento) y transversales (perpendiculares al eje del pavimento) como en esquina. Estas últimas son fisuras diagonales que intersecan 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 presencia o ausencia de material sellador en las juntas de contracción.

Con los datos obtenidos se realizó un estudio estadístico para determinar el

estado de conservación y las causas principales de deterioro. Para la determinación de la porosidad, las muestras se secaron en horno hasta obtener masa constante, a una temperatura entre 100 °C y 110 °C, por 24 horas, y se determinó el peso de la masa seca. Luego se sumergió en agua a temperatura ambiente por 48 horas, se retiró, se secó y se pesó, para determinar así la masa saturada y la superficie seca. Se colocó la muestra en un recipiente con agua hasta ebullición durante cinco horas. Se enfrió hasta temperatura ambiente y nuevamente se pesó. Finalmente, se utilizó una balanza hidrostática para el cálculo de la masa aparente. Con estos parámetros se obtuvieron los valores de absorción, densidad relativa en estado saturado, superficie seca y porosidad. Como un criterio de evaluación, se acepta que un valor de porosidad por debajo de 10 % indica un hormigón de buena calidad y compacidad, entre 10 % y 15 %, uno de moderada calidad, y si se supera el 15 %, se considera que el hormigón no tendrá una adecuada durabilidad (CYTED, 1998). 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.

Para la evaluación del comportamiento hidrodinámico de la zona no saturada se realizó una modelación numérica empleando el código HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.*, 2006). La metodología de trabajo se sustenta en experiencias afines como las de Ajdary (2008), Kandelous y Simunek (2010) y Lexow (2010), entre otras. Se realizó un control bimensual de la profundidad del nivel freático a partir de una red de piezómetros ya instalados. Simultáneamente, se efectuaron muestreos de material de la ZNS para determinar la humedad gravimétrica, lo que permite transformar esas lecturas en humedad volumétrica y facilita la interpretación de las condiciones del potencial hidráulico que sustenta el modo, la magnitud y la dirección del flujo en la ZNS. Se realizaron simulaciones con el modelo matemático HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.*, 2006). El desarrollo de programas de computación para el cálculo de flujo y transporte de solutos en la ZNS permite, a partir del modelo conceptual hidrogeológico, su implementación como herramienta interpretativa. El límite superior del modelo, superficie del suelo, se consideró dependiente de las condiciones atmosféricas, variable en el tiempo, dominado por las precipitaciones medidas y la evapotranspiración real calculada por el programa en función de la evapotranspiración potencial. La importancia de avanzar en el conocimiento de las características hidrodinámicas e hidroquímicas que gobiernan dentro de la franja capilar es fundamental para la determinación del rendimiento específico en acuíferos libres, el ambiente particular que se crea y la ocurrencia de diversas reacciones químicas e importantes procesos de biodegradación por la coexistencia de grandes cantidades de agua y aire (Ronen *et al.*, 2000), la generación de una componente de flujo horizontal dentro de la franja capilar de acuíferos sometidos a drenajes (Kao *et al.*, 2001) y la componente de dispersión transversal como uno de los procesos relevantes de transferencia de masa de contaminantes (Klenk y Grathwohl, 2002).

Los parámetros hidráulicos no saturados (donde θ_s es el contenido de humedad del suelo en saturación; θ_r es el contenido de humedad residual; α , n y l son constantes empíricas que condicionan la forma de la curva de retención; y K_s (m/d) es la permeabilidad

saturada) fueron ajustados según el código RECT (Van Genuchten *et al.*, 1991). Las funciones hidráulicas, definidas de acuerdo al modelo de Van Genuchten-Mualem (Van Genuchten *et al.*, 1991), se aplicaron luego por medio del código HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.*, 2006). La naturaleza de esta porción del subsuelo corresponde a una zona por encima del nivel freático donde el contenido de agua en el medio poroso es igual al de saturación θ_s y $p < 0$ (presión negativa). A partir de este precepto, e introduciendo el concepto de tensión de entrada de aire (h_a), se define a la franja capilar para un medio poroso dado 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 h_{FC} , para una condición hidrostática de equilibrio, está comprendida por una superficie inferior donde $h = 0$ y otra superior de tensión matricial $h = h_a$. Se define h_a como la succión mínima h que debe ser aplicada sobre un medio saturado para comenzar a extraer agua de los poros de mayor tamaño (Wang *et al.*, 2000). Y se determina utilizando la relación:

$$h_a = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{n-1}{n(m+1)-n+1} \right]^{1/n} = \begin{cases} m^{1/n} / \alpha \\ 1 / \alpha \end{cases} \quad (1)$$

Resultando $m^{1/n} / \alpha$ ó $1 / \alpha$ si se ha utilizado la relación $m = 1 - 1/n$ ó $m = 1 - 2/n$ respectivamente.

RESULTADOS

Estudio petrográfico de los agregados y hormigones

Los materiales utilizados como agregado en los hormigones de los pavimentos relevados presentan una composición litológica semejante. El agregado grueso es en general piedra partida granítica. En solo dos cuadras del sector urbano, se identificó canto rodado polimíctico y mezcla de ambos en otras dos cuadras. Los pavimentos más nuevos tienen en la superficie una terminación con binder (quince esquinas y seis cuadras). En la composición de este último y 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.

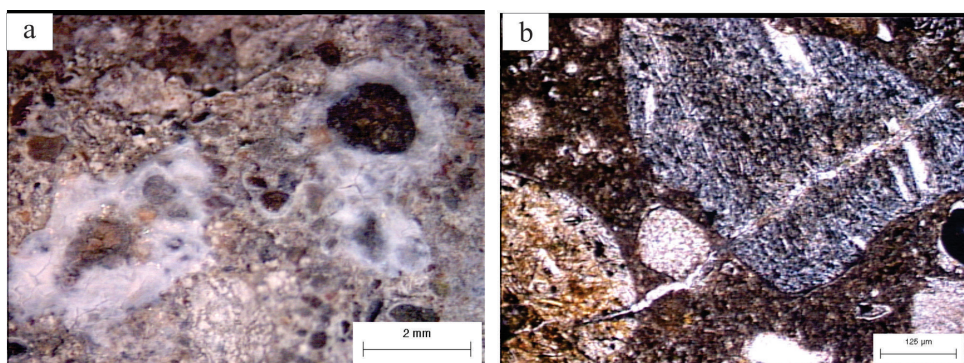
El agregado fino en todos los casos es una arena natural en cuya composición predominan ampliamente las rocas volcánicas con cantidades subordinadas de rocas graníticas, valvas carbonáticas y partículas individuales de cuarzo, feldespato, vidrio volcánico, minerales opacos, y escasos piroxenos y micas.

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. Se observaron claras evidencias de deterioro en la rotonda de acceso de la ciudad de Bahía Blanca. Sin embargo ninguno de los pavimentos urbanos está afectado por esta patología. Esto

se debe a que para que se desarrolle este tipo de reacción se necesitan tres factores concurrentes: agregados deletéreos, elevado contenido de álcalis y humedad.

El hormigón de la rotonda presenta claras evidencias de deterioro. Son abundantes las cavidades de aire accidental, las que en general se encuentran colmatadas por productos de neoformación (calcita, portlandita y silicatos de calcio). Los agregados finos presentan coronas de reacción, con evidencias de procesos de lixiviación y perturbación en la textura del mortero. El producto de reacción formado en esta zona es amorfo, color ámbar y de fractura concoidea, característico de la RAS. A nivel macroscópico se observa el típico fisuramiento en forma de mapa, con grietas dispuestas a 120° que parten de un mismo punto, y diferentes niveles de apertura. Estas no solo afectan al mortero sino también a algunas partículas del agregado fino. Este fenómeno también pudo observarse a nivel microscópico. En la figura 1.a. se observa (con estereomicroscopio) el desarrollo de coronas de reacción y materiales de neoformación vinculados con el agregado fino. La figura 1.b. (con microscopía óptica sobre secciones delgadas) muestra el microfisuramiento que afecta a la pasta y dos partículas de agregado fino reactivo.

Figura 1.a. Visto con estereomicroscopio. Desarrollo de coronas de reacción y materiales de neoformación
Figura 1.b. Con microscopía óptica sobre secciones delgadas. Abundantes microfisuras rellenas que afectan al mortero y al agregado fino



Ensayos físicos sobre muestras de pavimento

Los valores promedio de absorción, densidad y porosidad obtenidos son: 3,1 %; 2,4 % y 7,8 %, con un desvío estándar de 1,2; 0,05 y 3,1 respectivamente. Se observó la falta de material flexible en las juntas de contracción. La mayoría están vacías 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.

El 48,1 % de las losas relevadas presenta deterioro, por lo que es necesario un reemplazo total en un 14 % de los casos. El 46,8 % de las losas dañadas presentan fallas estructurales (40,8 % fisuras longitudinales y transversales, el 6 % fisuras en esquina y en el 1,3 % de los casos se observaron ambas) (figura 2.a.). Es frecuente observar fisuras por retracción y lavado superficial en las placas que tienen agregado grueso de mayor tamaño y,

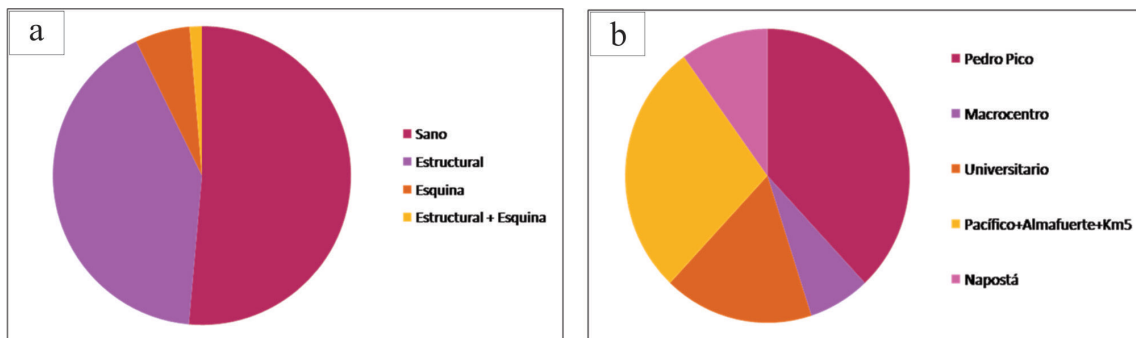
en especial, en las bocacalles. Esto se debe al efecto abrasivo del tránsito y a un drenaje inadecuado o insuficiente del agua de lluvia que permite su acumulación sobre el pavimento.

Si bien solo el 18,7 % de los pavimentos del área total relevada son de hormigón, esta distribución es heterogénea según los barrios. En el microcentro la totalidad del pavimento es flexible. El macrocentro y los barrios Universitario, Pacífico, Almafuerte y Km 5 tienen entre el 8 % y 13 % de hormigón, mientras que el barrio Pedro Pico y Napostá, el 42 % y 38 % respectivamente (figura 2.b.).

Los pavimentos que mejor estado presentan son los del barrio Napostá (56 % sanos) y los más deteriorados son los del barrio Universitario (53 % dañado). La causa de falla en todos los casos es estructural. El 14 % en promedio necesita reemplazo debido al avanzado estado de deterioro (entre 4,8 % para el barrio Napostá y 10 % en el macrocentro).

Figura 2.a. Distribución de las placas de hormigón relevadas por barrios

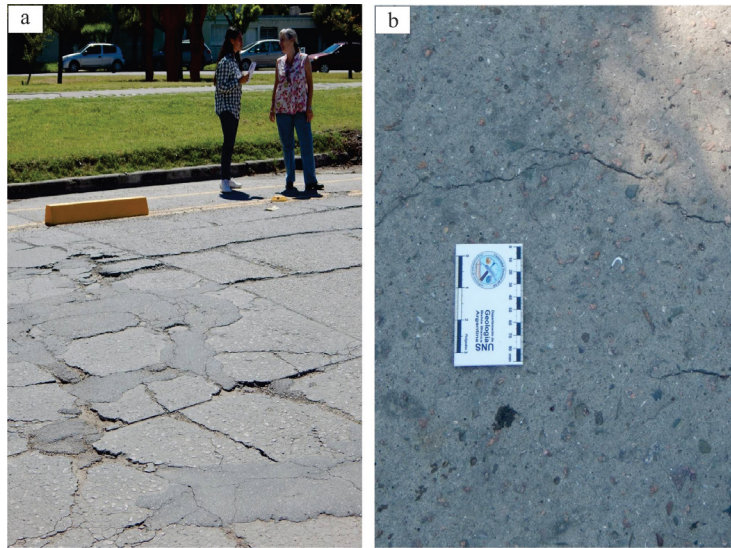
Figura 2.b. Estado de conservación



La principal causa de deterioro de los pavimentos relevados de la ciudad de Bahía Blanca está relacionada a fallas estructurales (figura 3.a.) y a la falta de mantenimiento. En contados 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 identificaron reacciones deletéreas tipo RAS a pesar de que el agregado fino y el canto rodado contienen especies deletéreas (rocas volcánicas con pastas vítreas y trizas de vidrio). Es frecuente la presencia de fisuras por retracción (figura 3.b.).

Los valores de densidad medidos son muy uniformes y los de porosidad y absorción resultaron 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.

Figura 3.a. Fallas estructurales
Figura 3.b. Fisuras por retracción



Comportamiento hidrodinámico de la zona no saturada

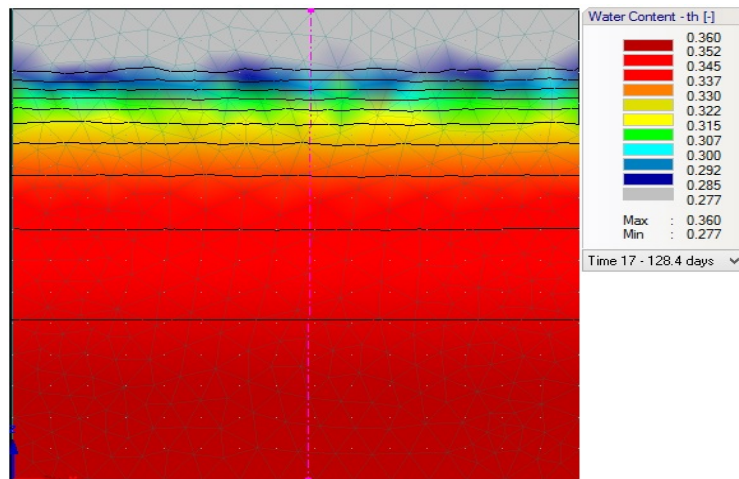
La configuración del modelo mediante el código HYDRUS 2D/3D consistió en un medio físico que resulta en un dominio geométrico cuadrado, cuya profundidad y superficie se consideró de 150 cm, conformado por una malla de 380 nodos y 698 elementos. A partir de los parámetros hidráulicos no saturados, según el código RECT (Van Genuchten *et al.*, 1991), y las funciones hidráulicas calculadas por el modelo de Van Genuchten-Mualem implementadas por el mismo código HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.*, 2006) (tabla 1), se determinó la altura de la franja capilar h_a , aplicando (1) y $1/\alpha$, lo que resulta en $h_a = -200$ cm.

Tabla 1. Parámetros hidráulicos no saturados

Mat	Q_r	Q_s	Alpha	n	K_s	l
1	0,07	0,36	0,005	1,09	0,48	0,5

El código HYDRUS 2D/3D arroja perfiles de humedad de la ZNS donde las diferencias sustantivas se observan en los niveles superiores (menores a 30 cm) (figura 4), aunque en términos relativos las tendencias de desecamiento y humectación son reproducidas correlativamente a los períodos secos (mayor evapotranspiración) y húmedos (precipitaciones), respectivamente. A mayor profundidad, en la medida que se aproxima al nivel freático, el contenido medio de humedad se mantiene más o menos constante. La franja capilar se moviliza masivamente junto a las fluctuaciones del nivel freático tal como se describieron en trabajos anteriores (Lexow y Bonorino, 2005; Lexow, 2010).

Figura 4. Perfil de humedad volumétrica de la ZNS



Con el valor de $h_a = -200$ cm y a partir de los valores de la curva de retención (figura 5) se determinó el valor de humedad correspondiente (0,344). Este último luego se ubica dentro del perfil de humedad del suelo determinándose una altura desde la base de 110 cm (figura 6).

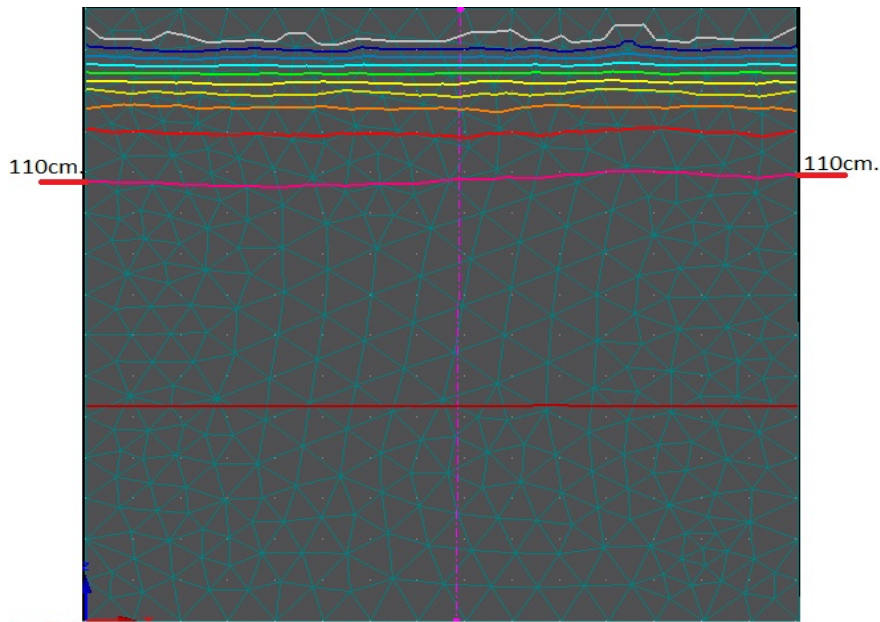
Figura 5. Relación datos de la curva de retención (izquierda) y de la curva de humedad del suelo (derecha)

	C1	C2		C1	C2
R76	115	0.3497	R8	26.0442	0.334782
R77	138	0.348	R9	33.3263	0.341049
R78	167	0.346	R10	37.9035	0.342599
R79	201	0.3438	R11	41.5782	0.343876
R80	242	0.3414	R12	44.4315	0.344383
R81	292	0.3388	R13	51.7254	0.345549
R82	351	0.336	R14	58.9396	0.346594
R83	423	0.333	R15	62.2778	0.347115

Curva de retención de humedad

Curva de humedad del suelo

Figura 6. Altura de la franja capilar



DISCUSIÓN

Los pliegos de especificaciones técnicas que rigen para la construcción de obras viales nacionales condicionan el uso de agregados potencialmente reactivos a partir del contenido de álcalis del cemento portland.

Estudios previos a este trabajo mencionan que todas las arenas naturales utilizadas en la zona de Bahía Blanca son potencialmente reactivas frente a la RAS, según el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) y el análisis petrográfico (IRAM 1649). También existen antecedentes del desarrollo de esta patología en pavimentos y otras estructuras de hormigón en la región.

Sin embargo, en los pavimentos relevados solo se encontraron evidencias del desarrollo de la RAS en la rotonda de acceso aunque todos los materiales utilizados como agregados finos contienen especies deletéreas.

A partir de estos resultados, se considera necesario analizar los otros dos factores desencadenantes de la RAS (contenido de álcalis y humedad relativa).

La representación hidrodinámica de la ZNS muestra comportamientos de extrema amplitud en el contenido de humedad en las porciones próximas a la superficie y una influencia importante de la franja capilar. Será destacado cuando la simulación incorpore condiciones tales como el pavimento impermeable y la salinidad tanto en el acuífero como en la ZNS.

Estos resultados son preliminares y se continuará el estudio en el resto de la ciudad para luego poder integrar los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

- La principal causa de deterioro de los pavimentos de la ciudad de Bahía Blanca en el sector relevado está relacionada a fallas estructurales y a la falta de mantenimiento. En escasos casos se observó levantamiento de placas por raíces de árboles.
- No se identificaron fallas debido a una incorrecta elección de los materiales dentro de los pavimentos urbanos. Los valores de densidad medidos son muy uniformes y los de porosidad y absorción resultaron 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.
- Los agregados utilizados son similares. El agregado grueso es una piedra partida granítica y el agregado fino una arena natural en cuya composición predominan las rocas volcánicas.
- Se identificaron materiales potencialmente reactivos frente a la RAS en el agregado fino (rocas volcánicas con pastas vítreas y trizas de vidrio).
- No se observaron evidencias del desarrollo de la RAS en los pavimentos urbanos, aunque sí en la rotonda de acceso sobre la ruta nacional n.º 33 (tanto en el hormigón original como en el de reparación), donde se observó fisuramiento en forma de mapa y el desarrollo de productos de neoformación.
- Se determinó una altura de franja capilar para sedimentos limoarcillosos de 110 centímetros aplicando el concepto de presión de entrada de aire en un medio poroso saturado.
- La representación hidrodinámica de la franja capilar en un suelo limo arcilloso por el código HYDRUS 2D/3D es satisfactoria. Los resultados alcanzados hasta el momento permiten indicar que existe una influencia hidrodinámica en los niveles superiores de la ZNS.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CGAMA, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires y a la Universidad Nacional del Sur por el apoyo brindado.

BIBLIOGRAFÍA

- AJDARY, K. (2008). "Application of HYDRUS-2D for Simulation of Water Distribution in Different Types of Soils". *International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology*, Turquía, pp. 253-261.
- CALÓ, J.; FERNÁNDEZ, E.; MARCOS, A. y ALDACOUR, H. (1999). "Construcciones de mapas geológicos-ingenieriles a partir de conocimientos previos compilados en una sistema de información geográfica". *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente (ASAGAI)*, n.º 13, pp.1-10.
- CITED, (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, p. 208.
- IRAM - INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997). IRAM 1674 -"Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero".
- IRAM - INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2008). IRAM 1649 -"Examen petrográfico de agregados para hormigón".
- IRASSAR, E. F. (2001). *Durabilidad del hormigón estructural*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina.
- KANDELOUS, M. M. y SIMUNEK, J. (2010). "Numerical Simulations of Water Movement in a Subsurface Drip Irrigation System under Field and Laboratory Conditions Using HYDRUS-2D". *Agricultural Water Management*, vol. 97, n.º 7, pp. 1070-1076.
- KAO, C.; BOUARFA, S. Y ZIMMER, D. (2001). "Steady State Analysis of Unsaturated Flow Above a Shallow Water-Table Aquifer Drained by Ditches". *Journal of Hydrology*, vol. 250, pp. 122-123.
- KLARIC, M. (2001). "Fisuración y ataques físicos al hormigón". En IRASSAR, E. F. (Ed). *Durabilidad del hormigón estructural* (pp. 47-95). Argentina: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- KLENK, I. D. y GRATHWOHL, P. (2002). "Transverse Vertical Dispersion in Groundwater and the Capillary Fringe". *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.58, pp. 111-128.
- LEXOW, C. (2010). "Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado". En VARNI, M.; EXTRAIGAS, I. y VIVES, L. (Eds.). *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras* (tomo 1)(pp. 279-286). Argentina: Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. J. Usunoff.
- LEXOW, C. y BONORINO, A.G. (2005). "Hidrodinámica de la franja capilar de un acuífero loésico". *IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea*. Tomo 2, pp. 55-64.

- MAIZA, P. y MARFIL, S.(2003). "Evolución de los pavimentos de concreto afectados por la reacción álcali-silíce (RAS) en la ciudad de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires, Argentina)". 10.º *Congreso Geológico Chileno*. Concepción, Chile.
- MARFIL, S. y MAIZA, P. (2000). "Pavimento de hormigón deteriorado por la reacción álcali - sílice, en un complejo edilicio de la ciudad de Bahía Blanca". *Congreso de Ingeniería 2000*, Buenos Aires, Argentina, vol. 2, pp. 44-50.
- MARFIL, S.; MAIZA, P. y SALOMÓN, R. (2001b). "ASR Induced Blow-up in an Urban Concrete Pavement (Bahía Blanca-Argentina)". *The International Journal of Pavement Engineering*, vol. 2, n.º 4, pp. 271-276.
- MARFIL, S., MAIZA, P. y SALOMÓN, R. (2001a). "Pavimentos de hormigón de la ciudad de Bahía Blanca. Su comportamiento frente a la RAS". *Revista de la Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, n.º 16, pp. 146-152.
- MEHTA, P. K. y MONTEIRO, P. J. M. (2006). *Concrete. Microstructure, Properties, and Materials* (3ªed.). New York, EE.UU.: McGraw-Hill.
- 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.
- PRIANO, C. y MARFIL, S. (2009). "Evaluación del estado de conservación de pavimentos de la ciudad de Bahía Blanca (Provincia de Buenos Aires).XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, VIII Congreso Internacional ITS, Mar del Plata, Argentina.
- PRIANO, C.; MARFIL, S; SEÑAS, L. y MAIZA, P. (2009). "Patología de un pavimento rígido de la ciudad de Bahía Blanca (Provincia de Buenos Aires)".XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, VIII Congreso Internacional ITS. Mar del Plata, Argentina.
- PRIANO, C.; MARFIL, S. y SEÑAS, S. (2006). "Ruta de circunvalación a la ciudad de Bahía Blanca. Evaluación del deterioro del pavimento de hormigón". 16.º *Reunión Técnica de la AATH*, Mendoza. Actas, pp. 307-314.
- RONEN, D.; SCHER, H. y BLUNT, M.(2000). "Field Observations of a Capillary Fringe before and after a Rainy Season". *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 44, n.º 2, pp. 103-118.
- SIMUNEK; J., SEJNA, M. y 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.
- STANTON, T. E. (1940). "Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate". *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 66, n.º 10, 1781-1811.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J. y YATES, S. R. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. Washington, EE.UU.: Environmental Protection Agency.

WANG, Z.; WU, L. Y Wu, Q. J. (2000). "Water-Entry Value as an Alternative Indicator of Soil Water-Repellency and Wettability". *Journal of Hydrology*, pp. 76-83.