

Pavimentos - T 140

ESTUDIO DE LOSAS DE HORMIGÓN DE LA RUTA PROVINCIAL N 1, PROVINCIA DE CÓRDOBA

Francisco LOCATI *

Fernanda POKLEPOVIC **

Raúl SILVA **

Cecilia ALT **

Pedro MAIZA ***

Silvina MARFIL ***

(*) FCEFyN - UNC - CICTERRA.

(**) Dirección Provincial de Vialidad de la Provincia de Córdoba,
Departamento I, Tecnología y Laboratorio.

(***) UNS. Bahía Blanca.

ARGENTINA

Estudio de losas de hormigón de la Ruta Provincial N°1, Provincia de Córdoba

Locati, F.^{1a}, Poklepovic, F.^{2b}, Silva, R.^{2b}, Alt, C.^{2b}, Maiza, P.^{3c}, Marfil, S.^{3d}

1. Cátedra de Geología General - FCEFYN - UNC - CICTERRA.
Córdoba
2. Dirección Provincial de Vialidad de la Provincia de Córdoba, Departamento I, Tecnología y Laboratorio. Córdoba.
3. Dpto. de Geología – UNS. Bahía Blanca.

Resumen

La problemática de la durabilidad de los pavimentos de hormigón involucra diferentes factores que abarcan desde las características químicas de los cementos, la mineralogía, textura y propiedades físico-mecánicas de los agregados, la dosificación, los aspectos constructivos, las condiciones ambientales reinantes durante la vida en servicio de la obra y las solicitaciones a las cuales fue sometida la estructura. Las numerosas variables implicadas dificultan la detección de la causalidad del deterioro, aunque distintas metodologías de estudio contribuyen al conocimiento del mecanismo de degradación, ponderando cada variable para establecer el origen y la secuencia de eventos que culminan con el de la estructura.

El pavimento de hormigón de la Ruta Provincial N° 1, que une las localidades de San Francisco y Morteros (Provincia de Córdoba), presenta un marcado deterioro evidenciado por el complejo patrón de fisuración, escalonamiento y ruptura de las losas. Aquellos sectores con una intensa densificación del mapeo de discontinuidades están actualmente siendo reemplazados, la obra tiene entre 26 y 30 años en servicio. En el material removido se observa una reacción entre el agregado y el mortero, restringida frecuentemente al tercio inferior pero que en algunos sectores afecta al espesor total de losa (~20 cm). Para la identificación de las reacciones y los procesos involucrados se extrajeron muestras de las losas removidas y en aquellas con una fisuración que podría vincularse a la RAS, las

a Estudiante del Doctorado en Ciencias Geológicas en la FCEFYN (UNC) – Becario CONICET.

b Profesional de la Dirección de Vialidad de la Provincia de Córdoba

c Investigador CONICET-INGEOSUR

d Investigador CIC-INGEOSUR

muestras se analizaron mediante el examen petrográfico, difracción de rayos X, ensayos de resistencia y análisis químicos.

Los agregados gruesos en general son de tipo metamórfico y corresponden a gneises biotíticos-granatíferos, afectados por procesos de deformación, los agregados finos en su mayoría corresponden a clastos poligranulares de cuarzo o granos monominerales de cuarzo, feldespatos potásico y plagioclasa.

La pasta de hormigón se encuentra en buen estado aunque se observan microfisuras de escala micrométrica a milimétrica, algunas con relleno parcial. Los poros frecuentemente se presentan parcial y/o totalmente tapizados por un mineral secundario identificado como ettringita, que incluso puede colmatar las cavidades.

En la superficie del mortero y en las zonas de interfase agregado grueso – mortero son abundantes los productos de neoformación, determinados por DRX como calcita, portlandita y ettringita, estas últimas como fases subordinadas.

La aplicación conjunta de distintas metodologías de estudio resulta una estrategia fundamental a la hora de evaluar cuáles fueron las causas del deterioro de una estructura. La utilización de herramientas aisladas puede llevarnos a detectar solo parte de la problemática y generar confusiones respecto de los factores y procesos que produjeron los efectos nocivos.

El motivo del deterioro parece estar vinculado a diversos factores principalmente constructivos y de mantenimiento.

1. Introducción

La durabilidad de una estructura de hormigón representa la interacción de diferentes factores que contemplan la composición química del cemento, la mineralogía, textura y propiedades físico-mecánicas de los agregados, la dosificación, la relación a/c, la abundancia y conectividad de los poros del hormigón, los aspectos constructivos, las condiciones ambientales y sollicitaciones a la cuales estuvo sometida la estructura (Fernández Luco et al. 2001). En las últimas décadas se ha incorporado a la petrografía como un examen rutinario para evaluar la condición inerte de los agregados, enfocada a determinar la presencia de minerales deletéreos; muchas de las técnicas aplicadas habitualmente en el contexto estrictamente geológico son aplicadas en la tecnología del hormigón para caracterizar, cuantificar y modelar las distintas patologías del hormigón.

El pavimento de hormigón de la Ruta Provincial N° 1, provincia de Córdoba, que une las localidades de San Francisco y Morteros (Figura 1), presenta un marcado deterioro

evidenciado por el complejo patrón de fisuración, escalonamientos y ruptura de las losas. Esta obra fue ejecutada a comienzo de la década del 1980, dividida en tres tramos: San Francisco - Porteña, Porteña- Prog. 57,2km y Porteña (Prog. 57,2km) - límite con Santa Fe, con una longitud total de aproximadamente 95km. Las tareas actualmente de reparación realizadas en los sectores más deteriorados incluyen la remoción y ejecución de algunas losas de hormigón; esta tarea permitió observar una marcada patología desarrollada en el tercio inferior de la losa que alcanza mayor desarrollo según la densificación de las discontinuidades. En el

siguiente trabajo se hace una completa recopilación de los antecedentes vinculados a la etapa de construcción de la obra y se evalúan las características actuales de la misma para entender las causas que dieron origen a su deterioro.

2. Antecedentes de la obra

2.1. Características constructivas de la obra

La Ruta Provincial N°1 correspondiente a la red primaria provincial, se desarrolla en el cuadrante noreste de la provincia de Córdoba, en dirección norte-sur y une entre otras a las ciudades de San Francisco, Porteña, Brinkmann y Morteros, con una longitud aproximada a los 95km.

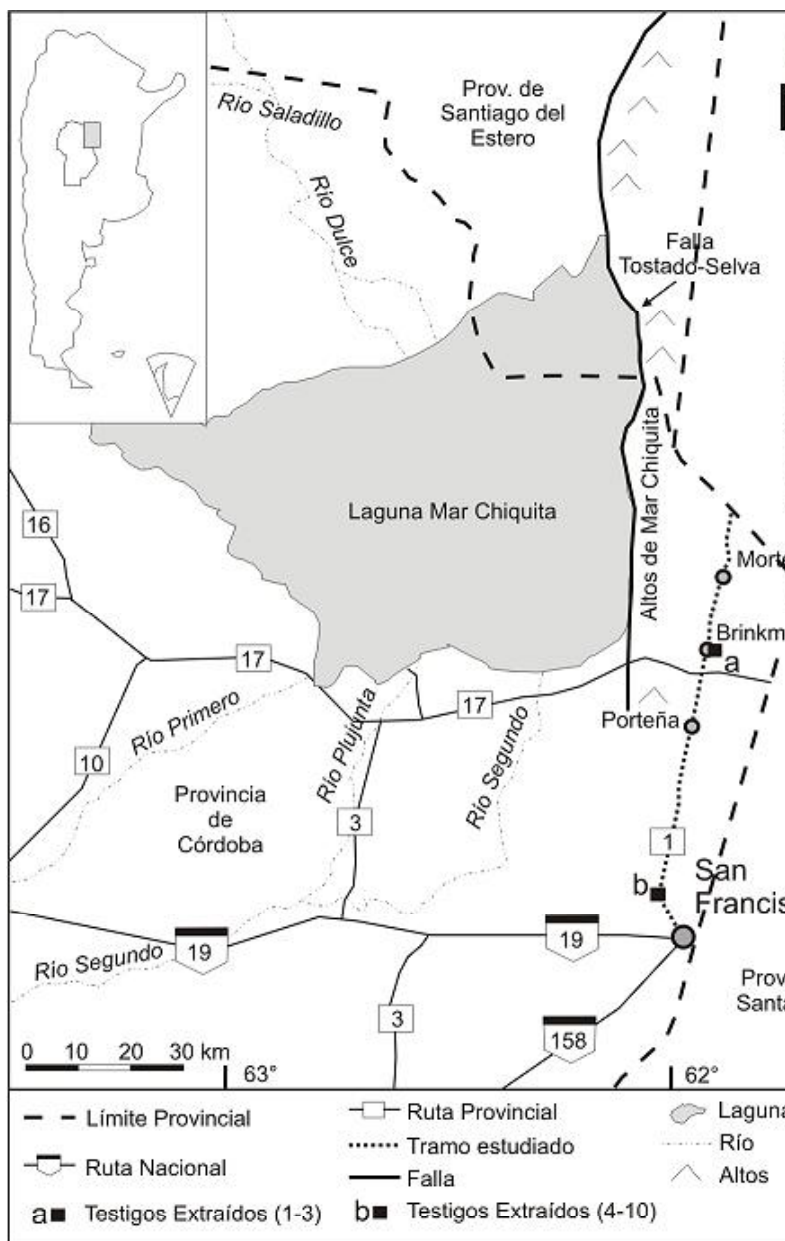


Figura 1.- Ubicación del tramo estudiado (Ruta Provincial N° 1). Los puntos a y b corresponden a las zonas donde

Resulta la obra de mayor longitud de la red provincial ejecutada en pavimento rígido, desde entonces y hasta la fecha. La obra se planteó en tres tramos, el primero de 50,0km entre las localidades de San Francisco y Porteña; el segundo desde Porteña hacia Seeber con una longitud de 7,2km; y el tercer tramo desde el final del segundo y hasta el límite con la provincia de Santa Fe de aproximadamente 36,9km; adjudicados a distintas empresas y con diseños estructurales diferentes.

- *Tramo San Francisco- Porteña*

En este tramo el diseño del pavimento rígido preveía un ancho de calzada de 7,30m y un espesor de 0,20m, con pasadores de acero común de 25mm de diámetro, 50cm de longitud y 30cm de separación para las juntas de contracción separadas cada 5m y normales al eje longitudinal de la calzada, barras de unión de acero especial de 8mm de diámetro y 55cm de longitud y 50cm de separación para la junta central longitudinal. Juntas de expansión en empalmes y en coincidencias con estructuras existentes.

El proyecto contemplaba la realización del pavimento de hormigón sobre la carpeta asfáltica preexistente cuando su estado lo permitía, en otros en malas condiciones preveía la ejecución de una base de suelo-cemento sobre la antigua calzada (e=10cm), en ambos casos y a nivel de la rasante existente se efectuaron ensanches con suelo-cemento de 0,20m de espesor y 0,50m de ancho a cada lado. En los casos de nueva traza, el proyecto de la estructura contempló una base antibombeo de 0,15 m de espesor.

Los terraplenes se realizaban con suelos de préstamo lateral, utilizándose suelo seleccionado en la ejecución de los últimos 30cm superiores del terraplén.

El suelo de yacimiento es clasificado como A₄(8), con un índice de plasticidad variable entre 4,8 y 9,9%, con valores de sales solubles totales de hasta 1,02% y sulfatos solubles menores a 0,34%. El curado de la base suelo-cemento se realizó con emulsión EBM1.

Los agregados utilizados en la elaboración del hormigón corresponden al área de La Calera para el agregado triturado grueso y de la cantera Las Higueras sobre Río II, próximo a la localidad de Villa Concepción El Tío, la arena silícea. El cemento utilizado, según el pliego de especificaciones particular, es de procedencia de Yocsina, de tipología normal.

La resistencia característica de los testigos debió ser superior a 280Kg/cm², la dosificación contempló 400kg de cemento, 180l de agua, 1,145tn/m³ de agregado grueso y 0,675tn/m³ de agregado fino. La elaboración del hormigón se realizó con planta dosificadora en peso, y un asentamiento especificado de 2 a 4cm. La distribución se realizó con una terminadora autopropulsada que diera el gálbo necesario para ejecutar toda la calzada de una sola vez y

contaba de un sistema mecánico de reglado longitudinal y transversal. El curado del hormigón se realizó con antisol.

Las juntas fueron aserradas con disco de acero y superficie de diamante, se sellaron con perfil de tipo neoprene sikanorm. Las juntas de contracción se realizaron cada 5m en dirección perpendicular al eje.

- *Tramo progresiva Porteña (50,0km) a progresiva 57,2km*

Con una longitud total de 7,2km fue concluido en el año 1979, ejecutada por la Empresa Vimeco. De este tramo no se cuenta con antecedentes.

- *Tramo Porteña- límite Santa Fe (prog. 57,2 - Límite Santa Fe)*

El proyecto se desarrolló sobre la traza existente, salvo las variantes a las zonas urbanas. El pavimento fue resuelto en la variante rígida, con un ancho de calzada de 7,30m, espesor mínimo de la losa de hormigón de 0,20m y ancho de coronamiento de 13,30m. Las juntas transversales de contracción son oblicuas respecto del eje de calzada, diseño que no considera el uso de pasadores en estos casos. El apoyo de las losas se previó sobre el pavimento existente previo ensanche en 0,40m de cada lado con mezcla similar a la sub-base cementada y con un espesor de 0,20m, y en las variantes a las zonas urbanas debía ejecutarse una sub-base de suelo (25%) - granular (75%) - cemento (3%). Tanto el terraplén como la subrasante se previó ejecutar con suelo de préstamos y yacimientos, material que debía cumplir las siguientes características: índice de plasticidad menor o igual a 10%, límite líquido menor a 40, sales totales menor a 1,5% y sulfatos menores a 0,5%.

El hormigón para calzada debía cumplir con una resistencia característica a la compresión sobre testigos de 280kg/cm^2 previéndose el siguiente dosaje: $0,385\text{tn/m}^3$ de cemento Pórtland normal, $0,639\text{tn/m}^3$ de agregado fino, $1,214\text{tn/m}^3$ de agregado grueso, 173l/m^3 de agua, una relación a/c de 0,45. El asentamiento proyectado fue de 2 a 4cm para moldes laterales fijos o de 3 a 5cm en el caso de encofrados deslizantes, siempre medidos en el cono de Abrams. (IRAM 1536).

El dosaje de obra denominado "dosaje 1" contempló la siguiente composición: $0,400\text{tn/m}^3$ de cemento Pórtland, 180l/m^3 de agua, $0,6415\text{tn/m}^3$ de agregado fino, $1,218\text{tn/m}^3$ de agregado grueso compuesto por $0,487\text{tn/m}^3$ de triturado 6-30mm (40%) y $0,731\text{tn/m}^3$ de triturado 30-50mm (60%) . Este dosaje se empleó en la ejecución de calzada que se inició el 22/09/81 de prog. 4,997 hacia prog. 0,00 y los testigos no alcanzaron los valores de

resistencia especificados, a pesar del alto tenor de cemento, el asentamiento variaba de 3cm a 6cm. Los testigos presentaban además el mortero desgranable, quebradizo y con aspecto de mal fraguado. En primera instancia se mejoró la intensidad del riego de curado de $0,25\text{l/m}^2$ a $0,50\text{l/m}^2$ mejorando el aspecto y la resistencia. Este dosaje se utilizó hasta el 29/10/81 (losa 2-9).

A partir del 30/10/81 y hasta el 11/11/81 se empleó el dosaje N°2 (losa 2-210 y 2-82) compuesto por $0,400\text{tn/m}^3$ de cemento, 175l/m^3 de agua, $0,647\text{tn/m}^3$ de agregado fino, $1,230\text{tn/m}^3$ de agregado grueso, compuesto por $0,480\text{tn/m}^3$ de triturado 6-30mm y $0,750\text{tn/m}^3$ de triturado 30-50mm, una relación a/c de 0,44, la incorporación de un fluidificante frioplast en la cantidad de $2,4\text{kg/m}^3$.

La corrección se estableció con un nuevo dosaje denominado "dosaje 3" con las siguientes características: $0,400\text{ tn/m}^3$ de cemento, 160l/m^3 de agua, $0,660\text{tn/m}^3$ de agregado fino, $1,253\text{tn/m}^3$ de agregado grueso, compuesto por $0,501\text{tn/m}^3$ de triturado 6-30mm y $0,752\text{tn/m}^3$ de triturado 30-50mm, una relación a/c de 0,40, la incorporación de un fluidificante plastiment BV40 en la cantidad de $1,5\text{kg/m}^3$ (0,375% del peso del cemento se recomendaba entre 0,2% y 0,5%). El asentamiento variaba entre 3cm y 5cm; con este último dosaje se logró mejorar los valores de resistencia a compresión simple, alcanzando las especificaciones. Estudios del Laboratorio de la DPV para el dosaje 3 obtuvieron resistencias en probetas a 28 días de 345kg/cm^2 . No obstante para algunas condiciones meteorológicas exigentes, se consignó un nuevo dosaje denominado "dosaje 4" con las siguientes proporciones: $0,400\text{ tn/m}^3$ de cemento 168l/m^3 de agua, $0,656\text{tn/m}^3$ de agregado fino, $1,247\text{tn/m}^3$ de agregado grueso, una relación a/c de 0,42 y $1,1\text{kg/m}^3$ (0,275%) de plastiment BV40, los estudios del Laboratorio de la DPV para este dosaje obtuvieron asentamientos del orden de 6cm y resistencias de hasta 317kg/cm^2 . Para condiciones termohúgricas mas favorables, cuando la temperaturas oscilaba entre 5 y 15°C y elevada humedad se volvió a utilizar el dosaje 1.

El hormigón era dosado en planta, mezclado y transportado en motohormigoneras y la distribución se efectuó con una terminadora autopropulsada que cubría todo el ancho en una sola pasada y con vibradores de placas, moldes deslizantes, tren terminador, Gomaco Internacional 650 S; y aplicación de membrana de curado Antisol E con dotación variable de hasta $0,5\text{l/m}^2$. Ante algunas dificultades que se presentaron en la efectividad de esta membrana, se realizaron distintas determinaciones con el ensayo de retención de humedad (ASTM-C-156-74/IRAM 1673) a efectos de verificar una pérdida de agua inferior a $0,055\text{gr/cm}^2$ ($0,55\text{l/m}^2$ en 72horas). Respecto de las determinaciones efectuadas por el ITH perdidas de $0,043\text{gr/cm}^2$ para una intensidad de $0,200\text{l/m}^2$, en obra se verificaron pérdidas

hasta cuatro veces superiores, $0,200\text{gr}/\text{cm}^2$ para una intensidad de riego de $0,250\text{l}/\text{m}^2$, según los antecedentes de la obra. Dependiendo de las condiciones meteorológicas y de textura de la superficie del hormigón las recomendaciones existentes a ese momento, eran de $200\text{cm}^3/\text{m}^2$ a $270\text{cm}^3/\text{m}^2$ como dotación del riego a fin de lograr una película mínima de $200\mu\text{m}$ que proporciona un curado equivalente de 7 a 10 días; aunque según las recomendaciones de la American Concrete Institute (ACI) podría requerirse de hasta $400\text{cm}^3/\text{m}^2$ en condiciones desfavorables.

Al momento de la construcción de la obra proyectada, las condiciones tanto de la capa freática como del agua libre en zonas de préstamos y calzada existente, resultaron más críticas que en la etapa de proyecto. Esto tuvo incidencia en varios e importantes aspectos, en primer lugar el suelo para terraplén, sub-rasante y demás usos no pudo proveerse de préstamos laterales ni de los yacimientos previstos. En gran parte de la traza los préstamos estaban inundados, y en sectores también la calzada existente, se recurrió entonces a un yacimiento en la zona del canal Morteros que abasteció las necesidades de gran parte de la obra principal. Las condiciones del pavimento existente desmejoraron de tal forma que por ejemplo en el sector límite con Santa Fe – Morteros y fundamentalmente en los 5km inicial, el espesor medio de la calzada que apoyó directamente fue superior en $0,04\text{m}$ al mínimo previsto, por compensación en la restitución de gálibo. En el siguiente kilómetro y medio debió reciclarse lo existente en un espesor de $0,15\text{m}$ con la incorporación de un 3% de cal, y la construcción de una sub-base de similares características a la contemplada para la zona de variantes urbanas, en $0,15\text{m}$ de espesor. En los sectores comprendidos de prog. 24,200 a 26,560km; de prog. 31,100 a 31,400km y acceso norte a Brinkmann, se ejecutó una capa de suelo-cal en $0,15\text{m}$ de espesor a efectos de restituir la subrasante ante la destrucción total de la carpeta y base del pavimento preexistente. En la zona de la variante a Brinkmann existía agua libre en más de $0,50\text{m}$ como en otros varios sectores, de manera que debió recurrirse a distintas acciones como desbarres, mesa de trabajo con el empleo de cal para la posterior construcción de los terraplenes según las especificaciones del proyecto, elevación de cotas de subrasantes para alejarla de la capa freática.

2.2. Procedencia de los agregados y características físico-mecánicas

Los agregados gruesos utilizados en la elaboración del hormigón en el tramo San Francisco-Porteña corresponden al explotado en el área de La Calera, con un tamaño nominal de 4,8 a 51mm y un valor de desgaste de Los Ángeles menor a 30%. La procedencia del agregado

fino, arena silíceas, es de la cantera Las Higueras sobre Río II, en inmediaciones a la localidad de Villa Concepción El Tío.

En el tramo Porteña- límite con Santa Fe el triturado pétreo utilizado proviene de la cantera Yocsina (Corcemar), conformado por la granulometría 6-30mm y 30-50mm. Sus propiedades físico-mecánicas están caracterizadas a través del peso específico, equivalente a 2,78, desgaste Los Ángeles de 22,6% y cubicidad de 0,71. Los ensayos realizados sobre el agregado fino de la cantera Gudiño de Villa Concepción indican un módulo de fineza entre 2,73 y 3,21, equivalente arena variable de 86 a 89,7% y peso específico de 2,60. Por razones de provisión también se empleó la arena silíceas de la cantera Franch de la localidad de Tránsito, con un módulo de fineza de 3,06 y equivalente arena de 93,6%.

3. Materiales y Métodos

Se analizaron los antecedentes de la zona estudiada a partir de los archivos de Vialidad de la Provincia de Córdoba y de imágenes satelitales históricas del sector. Se realizó la observación in situ de la obra a fin de verificar su estado y decidir las áreas de extracción de los testigos de hormigón. Se realizaron cortes delgados para su observación bajo microscopio óptico de polarización. Se determinaron los productos de neoformación mediante análisis petrográfico y difracción de rayos x utilizando un difractor Rigaku D-Max III C con radiación de Cu K α y monocromador de grafito con 35Kv y 15mA. Se determinó la resistencia a la compresión de los testigos extraídos de las diferentes zonas. Se determinó el contenido de sulfato y sales totales en el suelo, en el agua subterránea y en la base de suelo-cemento. Se determinó la plasticidad del suelo de fondo de cuneta. Se determinó el nivel de carbonatación del hormigón a través de observación macroscópica utilizando tinción con fenolftaleína y observación bajo microscopio óptico de polarización. Los testigos se extrajeron según lo establecido en la norma 1551 para evaluar la estructura en servicio (IRAM 1874-2), se ensayaron los testigos sin daños para determinar la resistencia a la compresión (IRAM 1546). Las muestras de suelos y suelos estabilizados fueron analizadas para valorar la concentración de sales totales y sulfatos (norma VN E18-89), la presencia de carbonatos se valoró con el método del calcímetro de Bernard (norma NLT-116/59). Para la determinación de la composición química del agua se realizó el procedimiento establecido en las normas IRAM 1601, IRAM 1872 y ASTM D 1067-92.

4. Resultados

4.1. Observación in situ de la obra

La Ruta Provincial N°1 presenta diversas patologías que comprometen la durabilidad y serviciabilidad de la obra. A continuación se describen brevemente algunas de las observaciones realizadas vinculadas a la fisuración y degradación.

En el inicio del tramo de San Francisco-Porteña, primeros 5km, la zona de inserción de los pasadores muestra sistemáticamente un marcado deterioro, vinculado al posicionamiento superficial de los pasadores lo que compromete la transferencia de carga, esto puede observarse en el resto del tramo pero en forma puntual y aleatoria. También se manifiestan evidencias de fenómenos de bombeo con el desarrollo de los conductos entre la banquina y la losa, producto de la succión y expulsión de agua con suelo, con la posterior fisuración diagonal de las losas por acumulación de material fino en la interfase base-losa. Fisuras longitudinales de continuidad hasta 15m, con apertura de 3 a 5mm. Algunas losas muestran una distribución paralela con una separación entre 30 y 50cm; también se presentan escalonamientos de losas.

En sectores se observó el desarrollo de fisuras en mapa, sin orientación definida pero con mayor desarrollo en zonas aledañas a las juntas de contracción y fisuras longitudinales previas.

En el tramo de Porteña- límite Santa Fe es de relevancia el escalonamiento de losas fundamentalmente entre el cruce con R P N°17 y la localidad de Brinkmann, roturas de esquinas, fisuración longitudinal que afecta todo el espesor de la calzada (~20cm), fenómenos de bombeo y mapeo en distintos grados de avance acompañada de una decoloración. El diámetro de las distintas placas desarrolladas en el mapeo varía entre 5 y 10cm, fisuras que pueden estar rellenas por un material blanquecino, la apertura de estas fisuras raramente exceden los 3mm. Con el grado de avance de la patología disminuye el tamaño de las placas, y favorece el desprendimiento.

4.2. Extracción de testigos

Se seleccionaron cuatro zonas para la extracción de testigos tres ubicadas en el tramo San Francisco – Porteña (prog. 5,58km, 8,38km y 9,30km) y la restante en el tramo Porteña- límite Santa Fe (prog. 28,4km, variante de Brinkmann) (IRAM 1551).

Se extrajeron tres testigos de cada zona para evaluar la estructura siguiendo los lineamientos establecidos en la norma IRAM 1874-2, excepto en la progresiva 9,30km que

se obtuvo un único testigo con el fin de valorar el proceso de decoloración y exudación de un material blanquecino.

La litología de los agregados determinada mediante el análisis de los testigos extraídos de los distintos tramos muestran la naturaleza principalmente metamórfica, constituida por gneises masivos y bandeados, anfibolitas, en proporciones menores se presentan rocas graníticas y calcáreas metamórficas, estas últimas en el sector de Brinkmann. Los agregados gruesos presentan una morfología subangulosa, con una distribución homogénea y de graduación continua.

Las muestras tomadas en los puntos de mayor densidad de fisuras tipo mapa desarrolladas en cada losa, se caracterizan por una apertura hasta 3mm y un desarrollo en profundidad entre 5 y 7cm. Estas fisuras por lo general se prolongan siguiendo el contacto entre el agregado grueso y el mortero, solo una muestra mostró una marcada degradación en los primeros 10cm entre el agregado y la pasta.

Casi la totalidad de los testigos presentan el desarrollo de fisuras en la base, con una profundidad de entre 3 y 5cm.

Los poros, de tamaño variable entre 50 μ m y 1cm, muestran una distribución aleatoria en todo el espesor de la losa, con una morfología esférica. En contacto con los agregados de mayores dimensiones se observan poros de morfología elongada y mayores dimensiones (<1,5cm), algunos se presentan rellenos por minerales neoformados colmatando las cavidades.

En algunos testigos y muestras de las losas reemplazadas se observaron ciertos rasgos petrográficos descritos por Raphaël *et al.* (1989) como indicadores de la reacción álcali-agregado (RAA). La RAA se manifestaría por la generación de un borde de reacción y decoloración del agregado en el borde periférico, fracturas o microfracturas inter e intragranulares y separación de los planos de laminación de las metamorfitas de estructura bandeada.

En el mortero se observa el desarrollo de un frente de carbonatación desde la base de la losa hasta un tercio del espesor del hormigón, en la parte superior se restringe a 0,5cm evidenciado por la ausencia de reacción ante la fenoftaleína (Walker *et al.* 2006). En los contactos de los agregados se desarrolla un halo leucocrático que reacciona con el ácido clorhídrico, identificado como carbonato que se canaliza a partir de las fisuras y cavidades, avanzando sobre el mortero. Minerales solubles como cloruros y sulfatos también están presentes, fases que se solubilizan cuando los testigos o muestras son cortados con el disco diamantado refrigerado con agua.

El proceso de la RAA no fue evaluado con profundidad en esta etapa del trabajo, sólo se determinó la presencia de un material transparente, incoloro, de estructura amorfa (determinado por DRX) que tapiza algunas cavidades y bordes de fisuras, además de la presencia del mapeo característico a nivel de superficie en varios sectores.

4.3. Resistencia a la compresión de testigos

Se ensayaron a la compresión simple (IRAM 1546), por cada losa uno de los tres testigos obtenidos, seleccionándose el que presentaba menor fisuración, pero sin descartar ni la parte superior o inferior de las mismas. El testigo correspondiente al tramo Porteña –Límite con Santa Fe alcanzó una resistencia a la compresión simple corregida por altura, de 260,8kg/cm². Si tenemos en cuenta que en la valoración realizada en su etapa constructiva no se determinaron para este sector resistencias inferiores a las especificadas. Los antecedentes indican resistencias medias entre 317kg/cm² y 383kg/cm² (dosaje3, Cuadro 1), la reducción de la misma en este testigo, entre otros factores aún en proceso de evaluación, puede ser atribuible al grado de macro y microfisuración que presentan. El testigo 4 (prog. 5,58km) alcanzó una resistencia de 114,9kg/cm² y el N°10 (prog. 8,38km) 165,6kg/cm², ambos corresponden al tramo San Francisco-Porteña.

Sección	Sup. (m ²)	Nº Mtras	Resist. Media kg/cm ²	Resist. Caract. kg/cm ²	Coef. Variac.	a/c media	Dosaje	Curado (l/m ²)
1	7614	22	266	240	0,11	0,479	1	0,250
2	7621	18	265	245	0,09	0,454	1	0,250
3	7519	17	317	296	0,08	0,445	3	0,500
4	7519	20	322	303	0,07	0,417	3	0,500
5	6015	21	334	314	0,07	0,396	3	0,500
6	9206	24	344	326	0,06	0,394	3	0,500
7	9855	25	340	320	0,07	0,401	3	0,500
8	9694	23	354	335	0,06	0,395	3	0,500
9	9563	21	383	365	0,06	0,382	3	0,500
10	7205	20	338	295	0,15	0,453	1	0,500

Cuadro 1: Resumen comparativo de los antecedentes de las distintas secciones en el tramo Porteña-Límite Santa Fe. Cada muestra corresponde al promedio de dos testigos de una losa.

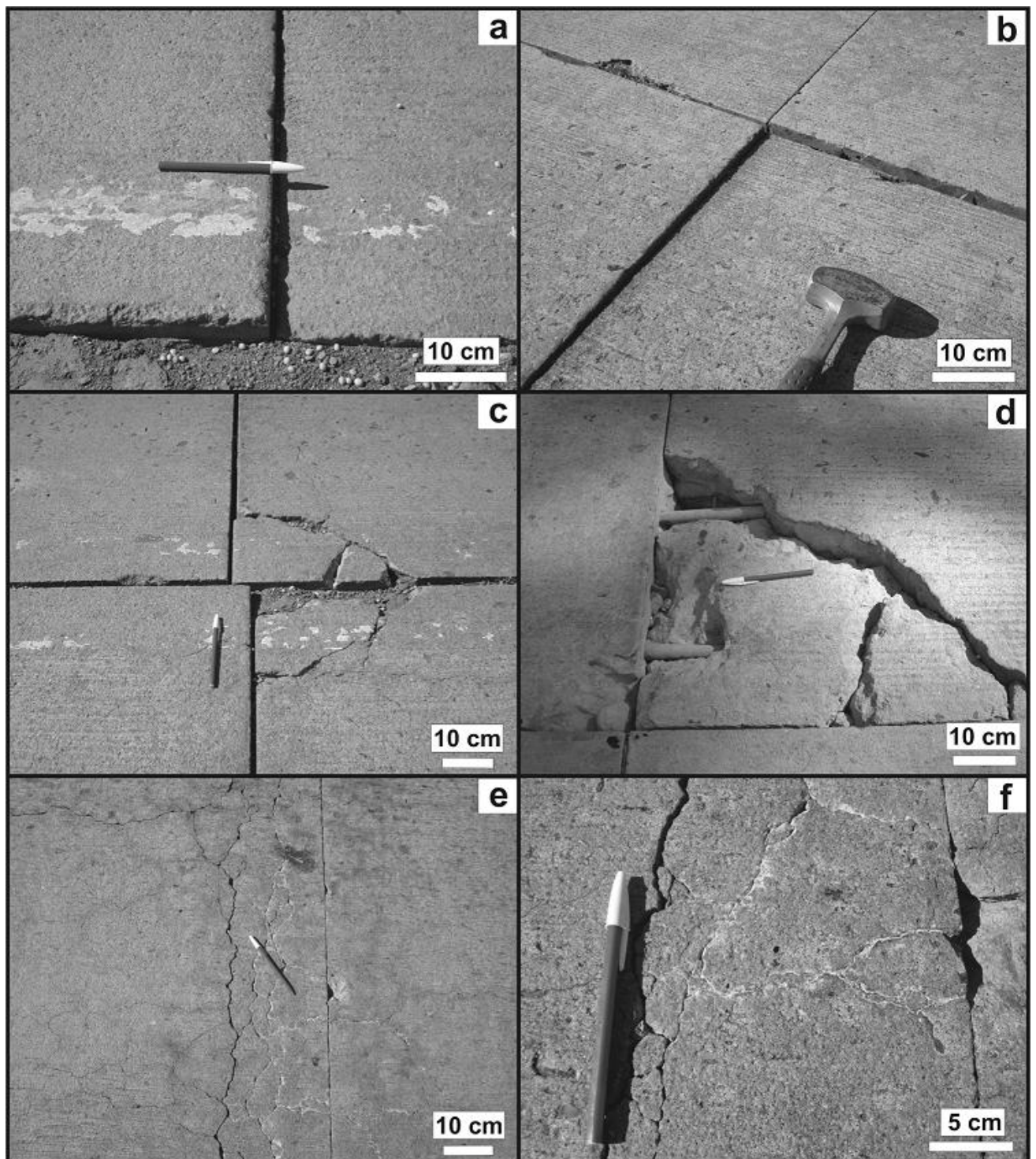


Figura 2.- Fotografías de la estructura. a y b) Escalonamiento de las losas. c) Losas dislocadas y ruptura de las esquinas. d) Ruptura de losas en la zona de pasadores. e) Zona fisurada en el sector de junta. Se observan fisuras de primer orden paralelas a la junta, no rellenas y de mayor apertura, y otras de segundo orden en forma de mapa, con paredes

oscurecidas a blanquecinas y de menor apertura. f) Acercamiento de las zonas con fisuras rellenas.

4.4. Microscopía óptica de polarización y determinación de productos de neoformación mediante Difracción de Rayos X

Las losas de hormigón presentan fisuras de importancia de tipo longitudinal, transversal, oblicuas y en mapa (Figura 2). Las fisuras dispuestas en mapa en ocasiones presentan relleno parcial.

En los testigos extraídos se observa una reacción entre el agregado y el mortero, restringida frecuentemente al tercio inferior pero que en algunos sectores afecta al espesor total de losa (~20 cm).

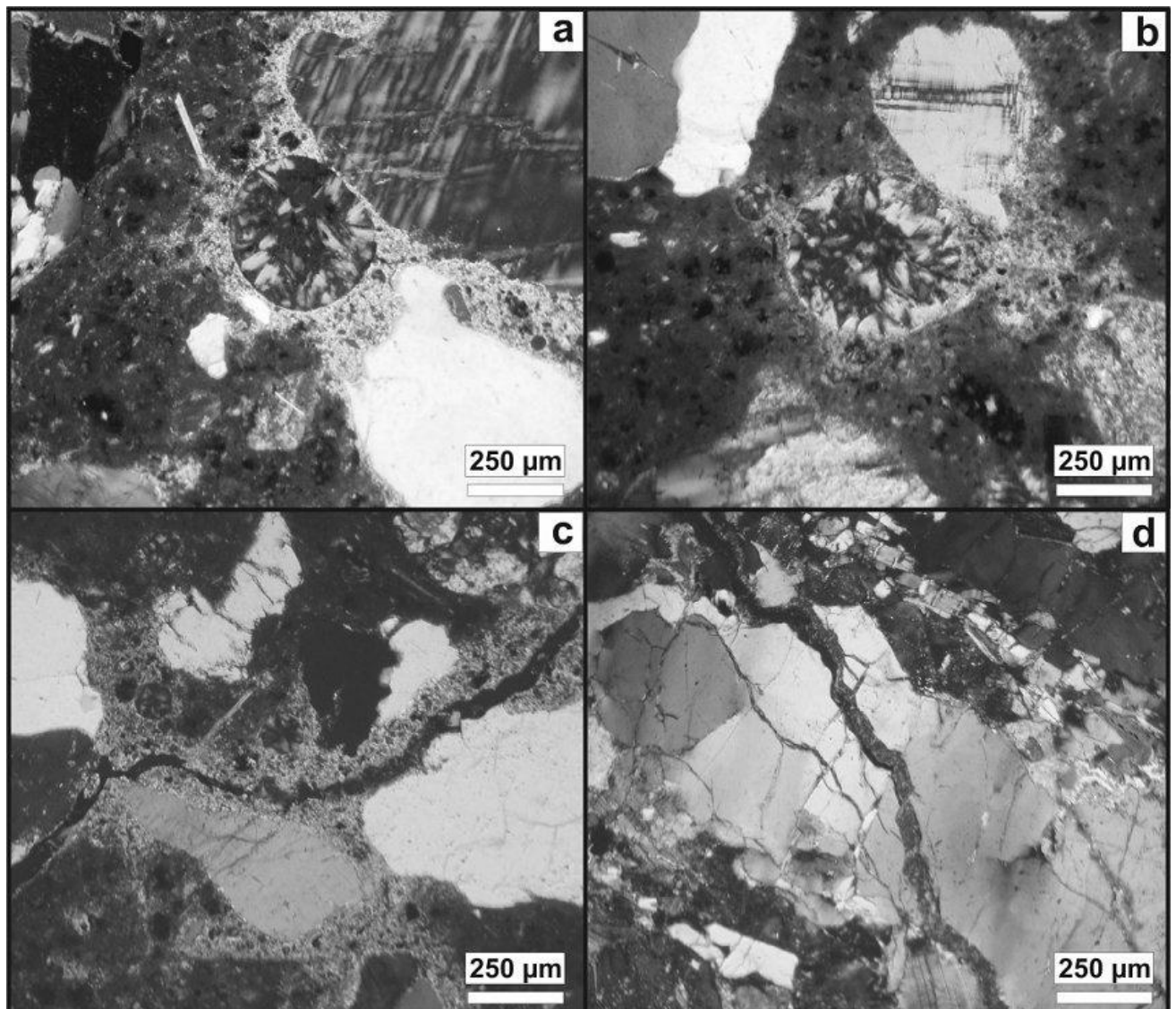


Figura 3.- a y b) Material de neoformación que rellena burbujas de aire (posiblemente ettringita). También se observa carbonatación asociada a bordes de burbujas y bordes de agregados. c) Fisura que atraviesa la pasta y separa algunos agregados del mortero. Se observa carbonatación en ambas paredes de la fisura y en los bordes de los agregados. d) Fisura que atraviesa un agregado. Presenta relleno de carbonato y minerales fibrosos posiblemente ettringita.

La pasta de hormigón se encuentra en buen estado aunque se observan microfisuras de escala micrométrica a milimétrica, algunas con relleno parcial en el contacto mortero-agregado que en ocasiones atraviesan los agregados. Los poros frecuentemente se presentan parcial y/o totalmente tapizados de un mineral acicular (posiblemente ettringita). Se observa carbonatación parcial del mortero en sectores próximos a las fisuras y cavidades. En ocasiones se observan agregados que se separan del mortero (Figura 3).

En la superficie del mortero, en las zonas de interfase agregado grueso – mortero y relleno de burbujas de aire, son abundantes los productos de neoformación. Se separó este material bajo el estereomicroscopio y se analizó por DRX determinándose la presencia de calcita de forma predominante y algunos sulfatos hidratados, no pudiendo determinar la especie mineral. También se identificaron silicatos de calcio hidratados productos frecuentes en la hidratación del cemento. Se atacaron las muestras con ácido clorhídrico para eliminar el carbonato y se observaron al microscopio petrográfico identificándose un material de hábito fibroso acicular correspondiente a un sulfato (no corresponde a yeso, posiblemente ettringita) junto a otro material isótropo de fractura irregular concoidal que no pudo ser identificado.

4.4. Determinación de la agresividad del suelo y agua en contacto con la estructura

Se analizaron muestras de suelo del fondo de cuneta extraídas a 0,60cm de la superficie del terreno, muestras de la base suelo-cemento y una muestra de agua de la capa freática para establecer la agresividad del entorno de la estructura (IRAM 1872).

La muestra de agua fue analizada para determinar el contenido de residuo sólido (35,4g/l), contenido de sulfato (312,4mg/l), cloruro (5,79g/l), pH (6,99), carbonatos (0%) y bicarbonatos (610mg/l), lo que indica que la freática muestra una composición netamente clorurada, con concentraciones de HCO_3^- y SO_4^- (IRAM 1601, IRAM 1872, ASTM D 1067-92). Los antecedentes del área en los estudios del agua para la elaboración del hormigón

indican para la planta del obrador, bomba municipal de Morteros, bomba de Tolosa, molino Tejero y laboratorio del obrador, los siguientes resultados (Cuadro 2).

Lugar	Sales totales g/l	Sulfatos (SO ₃) g/l	pH	Cloruros g/l
Planta Obrador	2,21	0,14	6,4	0,48
Bomba Municipal	1,75	0,21	6,2	-
	2,22	0,55	6,2	-
Bomba de Tolosa	2,86	0,34	6,1	-
	2,93	2,29	6,4	-
Molino de Tejero	2,02	0,52	6	-
	6,28	1,26	6,8	-
Laboratorio del obrador	2,55	0,55	5,9	-

Cuadro 2: Antecedentes de la composición química del agua subterránea.

Los análisis de aguas indican una alta concentración de sales totales y concentraciones de sulfatos mayores a 140mg/l. Los valores indican una clasificación de la agresividad de débil a moderada (Giovambattista, 2001).

En los suelos del fondo de cuneta y en la base suelo-cemento se determinaron la humedad natural, carbonato de calcio por el método del calcímetro de Bernard, y el contenido de sales y sulfatos (Norma V.N. E-18) (Cuadro 3).

Lugar		Humedad natural	Sales y sulfatos	Carbonatos
Prog. 5,58km	Suelo fondo de cuneta	13,57%	No flocula	2,58%
	Suelo-cemento	11,3%	No flocula	12,85%
Prog. 8,38km	Suelo fondo de cuneta	29,11%	No flocula	2,47%
	Suelo-cemento	12,66%	No flocula	10,67%
Prog. 28,4km	Suelo fondo de cuneta	23,47%	No flocula	3,24%
	Suelo-cemento	9,76%	No flocula	11,53%

Cuadro 3: Humedad natural, concentración de sales, sulfatos y carbonatos en los suelos de fondo de cuneta y la base suelo-cemento.

Ningunas de las muestras analizadas flocluló en el ensayo de determinación de sales y sulfatos indicando que su concentración es menor a 0,1%. Valores similares fueron establecidos en los suelos de los yacimientos, los antecedentes indican que los ensayos de determinación de sales totales oscilaba entre <0,1% y 0,29%, el contenido de sulfatos de <0,1% a 0,12% y no contenían carbonatos.

Los suelos naturales del fondo de cuneta presentan una concentración de carbonatos variable entre 2,47 y 3,24%, valores que presentan escasa dispersión; en la base suelo-cemento se determinaron concentraciones muy superiores, de 10,67 a 12,85%, valores que podrían indicar una mayor carbonatación pero debemos recordar que algunos componentes del cemento reaccionan con el HCl indicando una mayor disponibilidad de carbonatos.

5. Características morfoestructurales e hidrológicas del área

El sector noreste de la Provincia de Córdoba se caracteriza por el desarrollo de un cuerpo de agua salada denominado Laguna Mar Chiquita (Figura 1). Su extensión areal es variable con valores medios de 2000 a 4500 km² llegando a valores superiores de 6000 km² (datos de la SRH), dependiendo de las fluctuaciones del nivel de la misma.

Al este de la laguna se desarrolla la Falla Tostado-Selva de dirección norte-sur que eleva los sectores denominados Altos de Mar Chiquita, separando los dominios de la laguna del sector oriental denominado Bloque San Guillermo. Sobre este bloque, compuesto principalmente por sedimentos loésicos, se desarrolla el trazado de la Ruta Provincial N° 1, motivo de estudio de este trabajo.

La laguna presenta fluctuaciones anuales de nivel y presentó importantes fluctuaciones a través del tiempo, es por eso que el contenido salino de la misma fue variando con valores mínimos aproximados de 28,7g/l y valores máximos de 270,7g/l, siendo las sales más abundantes el cloruro de sodio y el sulfato de sodio, y en menor medida el sulfato de calcio y el sulfato de magnesio. El contenido salino parece estar relacionado al aporte del Río Saladillo que atraviesa la Salina de Ambargasta y desemboca en el Río Dulce con destino final en la laguna en épocas de crecidas, así como de las aguas subterráneas provenientes del oeste que se enriquecen en sales y que actúan balanceando los altos niveles de evaporación; sin embargo parece no producirse el proceso contrario de aporte de la laguna a las aguas subterráneas (Durigneux 1978, Martínez 1990, 1991, 1995, Martínez et al. 1994,

Reati et al. 1997, Dapeña y Panarello 2001, Piovano et al. 2002, 2004a, 2004b, Bucher y Bucher 2006, Pasquini et al. 2006, Troin et al. 2008).

Si bien los antecedentes bibliográficos evidencian comportamientos diferentes entre las aguas subterráneas que aportan a la laguna y los sectores ubicados al este de Los Altos, la salinidad del agua subterránea de todo el sector se ve incrementada por la interacción con los loess de la zona. Es importante aclarar también que ambos sectores actúan superficialmente como dos cuencas separadas.

A pesar de que el Bloque San Guillermo posee leve inclinación hacia el este y que actualmente la zona no se encuentra anegada, existen registros de anegamiento especialmente en la zona de la localidad de Morteros, asociados a períodos de precipitación intensa como consta en los registros de la etapa de construcción. Esto posiblemente se produzca debido a la existencia de viejas cañadas (Figura 4a1), fracturas jóvenes y de zonas deprimidas localizadas (Brunetto, 2008) que en épocas de fuertes lluvias se inundarían fácilmente.

Al vincular los datos de precipitaciones anuales de la zona, extraídos de Piovano et al. (2002, Figura 5), con las imágenes satelitales del año 1975 y 1981, podemos ver que esas características geomorfológicas del terreno se convierten en sectores propensos al anegamiento en períodos de precipitaciones intensas. La imagen del año 1975 se correspondería con el inicio de un período de precipitaciones intensas así como la del 1981 que también correspondería a un período de intensa precipitación y consecuente anegamiento.

Existen antecedentes de la obra a la altura de Brinkmann y de Morteros en la etapa inicial de su construcción, donde se observan bastas extensiones del terreno anegadas (Figura 6). Esto podría haber provocado una importante circulación de sales en la zona a través de procesos de inundación y sequía en períodos sucesivos.

Otro factor a tener en cuenta es el aporte salino a partir de plumas de polvo y sal provenientes de las playas de la Laguna Mar Chiquita que dependiendo de la dirección e intensidad del viento podrían haber llegado hasta la zona estudiada aportando importantes cantidades de sales que luego por acción de las lluvias podrían interactuar con los suelos, las aguas y con el hormigón de la ruta. Algunas evidencias de este proceso están documentadas a través de imágenes satelitales del año 2006 donde se observó el desarrollo de plumas de aproximadamente 200km de longitud, dándonos una idea de la extensión areal del proceso (Figura 7).

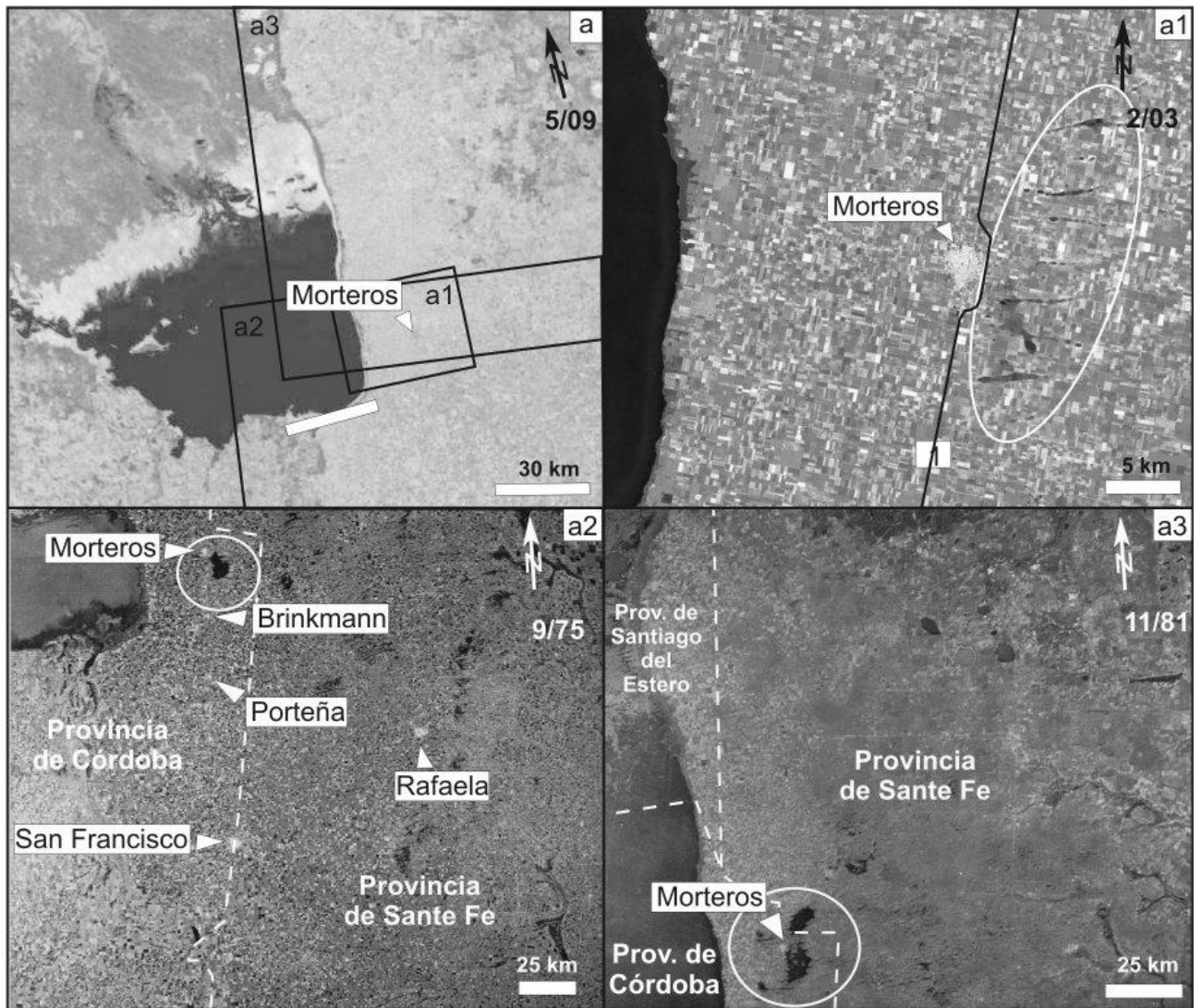


Figura 4.- Imágenes Satelitales de la Laguna Mar Chiquita. a) Imagen LANDSAT de mayo del 2009 (CONAE, Comisión Nacional de Actividades Espaciales). a1) Ciudad de Morteros. Pueden verse las paleo cañadas en dirección E-O de forma subparalelas muy cercanas a la ruta (círculo blanco). Imagen LANDSAT de febrero de 2003 (CONAE). a2) En épocas de intensa lluvia las cañadas y la zona deprimida asociada se inundan (se observa una mancha negra cerca de la ciudad de Morteros – círculo blanco). Imagen LANDSAT falso color compuesto de septiembre de 1975 (Atlas Total, 1982). a3) La zona anegada es mayor pero se localiza en los mismos sectores de cañadas y zonas deprimidas cercanos a la Localidad de Morteros y a la Ruta Provincial N° 1 (círculo blanco). Imagen LANDSAT falso color compuesto de noviembre de 1981 (Atlas Total, 1983).

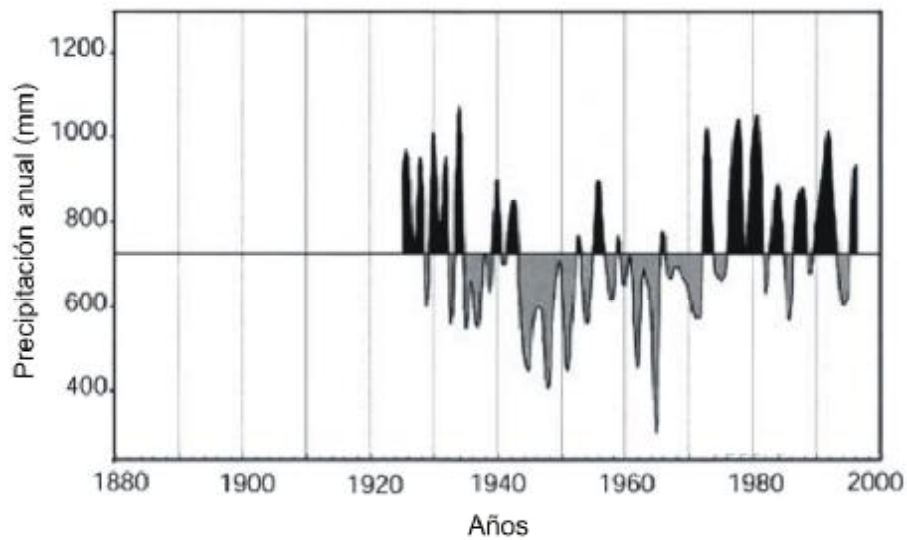


Figura 5.- Precipitaciones anuales (mm) en la zona de Mar Chiquita (Piovano et al. 2002). En gris se observan los valores más bajos que el promedio y en negro los valores mayores que el promedio.

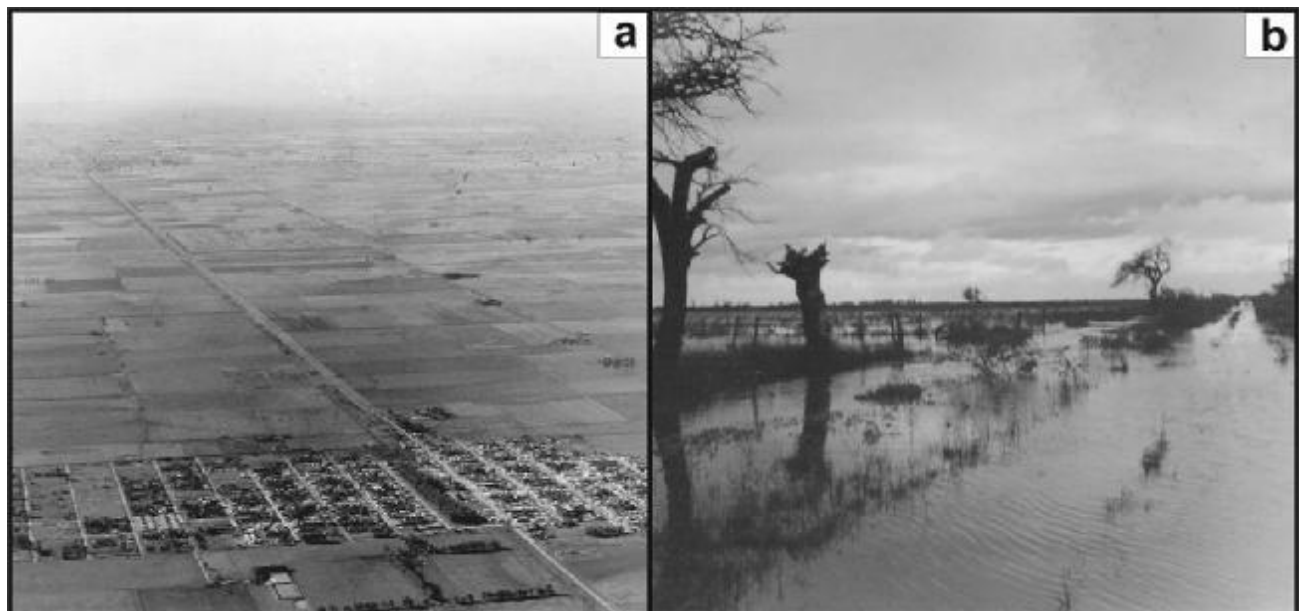


Figura 6.- Fotografías de zonas inundadas durante el período de construcción de la obra. a) Vista norte de la ciudad de Brinkmann de marzo de 1982. Los campos que aparecen con una tonalidad gris claro presentan intenso anegamiento b) Vista de un desvío (zona de Morteros) de febrero de 1981.

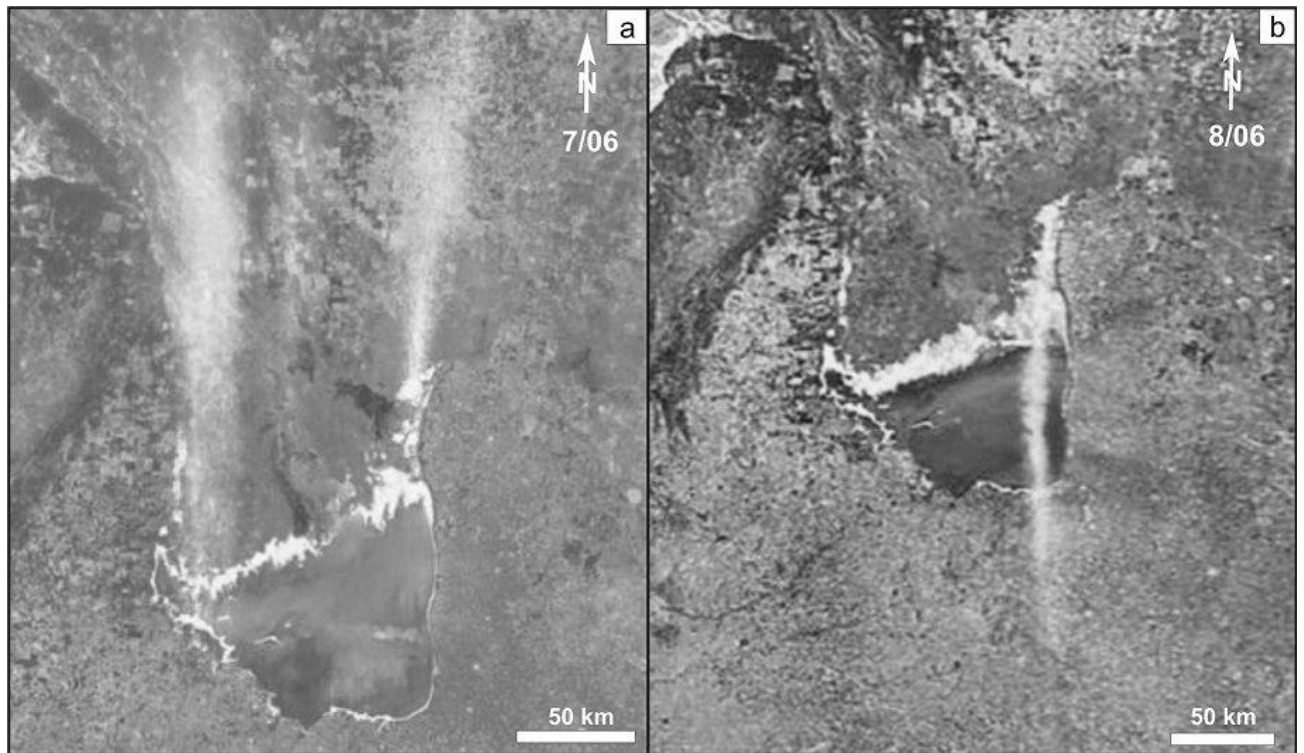


Figura 7.- Imágenes satelitales de plumas de polvo de sal producidas a partir de playas salinas. a) Plumaz causadas por vientos provenientes del sur el 29 de julio de 2006 (Aqua - MODIS, extraída de Bucher et al. 2006). b) Plumaz causadas por vientos provenientes del norte el 20 de agosto de 2006 (Aqua - MODIS, extraída de Bucher et al. 2006).

6. Discusión

Las fisuras diagonales ubicadas en las esquinas de las losas se deben al bombeo de las placas. La ruptura de la zona de pasadores se debe a la falta de profundidad en el proceso de colocación de los mismos. El bombeo propicia el escalonamiento y dislocación de losas; también aparecen algunas fisuras que podrían estar vinculadas con procesos de retracción y fatiga. Finalmente aparecen algunas fisuras dispuestas en forma de mapa que en ocasiones se asocian con minerales de neoformación.

La proveniencia de los sulfatos que precipitaron en el hormigón podrían deberse a diferentes causas. Los antecedentes bibliográficos apoyan la desvinculación del sistema hidrológico de la Laguna Mar Chiquita con la del Bloque San Guillermo, haciendo difícil la existencia de sulfatos por aporte salino de las aguas de la laguna, así como de las aguas subterráneas subyacentes a la misma.

Sin embargo la interacción de las aguas subterráneas en el Bloque San Guillermo con los loess de la zona podría haber sido la fuente de aporte salino a las soluciones que circularon en la estructura de hormigón en sucesivas etapas de inundación, coincidiendo con los períodos de intensa precipitación en el área.

Por otro lado también pudo haber aporte por plumas de polvo y sales provenientes de las playas salinas de la Laguna Mar Chiquita, que se hacen visibles especialmente en épocas de niveles bajos.

Ambos procesos podrían haber actuado de forma intercalada en períodos de sequía e inundación, introduciendo sales en la estructura fisurada.

Se descarta la circulación de agua rica en carbonatos ya que en el análisis químico del agua freática no se determinó su presencia, pero sí concentraciones de 630mg/l de HCO_3^- , la que por disociación podría ser la fuente (Ying-yu y Qui-dong, 1988). Asimismo, la disposición de la carbonatación en la pasta a nivel microscópico apoya dicha interpretación.

7. Conclusiones

La causa del deterioro inicial de la Ruta Provincial N° 1 está vinculada con problemas constructivos, de diseño y mantenimiento de la obra. Posteriormente, la fisuración facilitó la circulación de fluidos salinos generando (ya sea por la interacción con aguas subterráneas ricas en sales como por vientos cargados de sales) la precipitación de sulfatos en cavidades de aire y en fisuras. El fisuramiento inicial también provocó el ingreso de dióxido de carbono generando la carbonatación parcial del mortero. La permeabilidad de las losas de hormigón y capilaridad habría contribuido a la concentración de estos minerales de neoformación en el tercio inferior desde el sector de interfase base-hormigón con humedad disponible para el desarrollo de esta patología.

Todavía no se han dilucidado completamente las causas del deterioro y sería necesario un mayor número de análisis a fin de poder caracterizar las diferentes patologías existentes en la estructura y establecer la cronología de los diferentes eventos que produjeron el deterioro y afectaron la durabilidad de la obra.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba, a su Presidente Ing. Guillermo Elorza por su incondicional apoyo y por permitir su publicación, al Ing. Arturo Freytes por los antecedentes proporcionados de la obra y a los Técnicos del Dpto I

Tecnología y Laboratorio. A la Universidad Nacional de Córdoba, a la Universidad Nacional del Sur, al CONICET y a la CIC de la provincia de Buenos Aires.

Referencias

ASTM D 1067-92. Acidity or Alkalinity of Water. APHA Standard Methods, American Society for testing and Materials. Annual book of Standards, 1994, 2-26.

Atlas Total de la República Argentina. Centro Editor de América Latina, Mar Chiquita, n° 32: I-IV, 1982.

Atlas Total de la República Argentina. Centro Editor de América Latina, San Cristóbal, n° 77: I-IV, 1983.

Brunetto E. Actividad neotectónica en el sector oriental de la cuenca inferior del Río Dulce, Laguna Mar Chiquita y Bloque San Guillermo, FCEfYn-UNC, Tesis Doctoral (inédita), 2008, 305 p.

Bucher E. H., Coria R. D., Curto E. D., Lima J. J. Conservación y uso sustentable. En: Bañados del Río Dulce y laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina) (ED. Bucher E.H.), 2006, 327-341. Academia Nacional de Ciencias (Córdoba, Argentina).

Bucher E. H. y Bucher A. E. Limnología física y química. En: Bañados del Río Dulce y laguna Mar Chiquita (Córdoba, Argentina) (ED. Bucher E.H.), 2006, 79-101. Academia Nacional de Ciencias (Córdoba, Argentina).

Dapeña C., Panarello H. O. Isotopic study of the "Laguna Mar Chiquita", Córdoba, Argentina and its hydrogeological and paleoclimatological implications, IAEA-TECDOC-1206. IAEA, Viena, Austria, v.1, 2001, 7 - 15.

Durigneux J. Composición química de las aguas y barros de la Laguna Mar Chiquita en la Provincia de Córdoba. Miscelánea, Academia Nacional de Ciencias (Córdoba, Argentina), 59, 1978, 3-12.

Fernández Luco L., Klaric M. E., Irassar E. F., Batic O. R., Sota J. D., Traversa L. P., Giovambattista A. Durabilidad del Hormigón Estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Edgardo F. Irassar (Ed), 2001, Autoeditar, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Giovambattista A. El diseño por durabilidad de las estructuras de hormigón y los reglamentos de seguridad: soluciones actuales y en desarrollo. En: Durabilidad del Hormigón Estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Edgardo F. Irassar (Ed), 2001, 259-306. Autoeditar, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

IRAM 1536. Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono, 1978, 8 pp.

IRAM 1546. Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión. 1992, 6 pp.

IRAM 1551. Hormigón de cemento pórtland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido. 2000, 12 pp.

IRAM 1601. Agua para morteros y hormigones de cemento pórtland. 1986, 18 pp.

IRAM 1872. Hormigón. Agresividad del agua en contacto con estructuras. Métodos de ensayo para determinar pH, sulfatos solubles, magnesio y amonio. 2004, 16 pp.

IRAM 1873. Hormigón. Agresividad de suelos en contacto con estructuras. Métodos de ensayo para determinar sulfatos solubles en agua y en ácido. 2004, 10 pp.

IRAM 1874-2. Agregados para hormigones. Evaluación de estructuras en servicio. Parte 2: Reacción álcali-sílice, 2004, 12 pp.

Martínez D. E. Caracterización hidroquímica de los afluentes a la Laguna Mar Chiquita, Provincia de Córdoba. X1 Congreso Geológico Argentino, San Juan, Actas I, 1990, 227-230.

Martínez D. Changes in the ionic composition of a saline lake, Mar Chiquita, Province of Córdoba, Argentina, *International Journal of Salt Lake Research* 4, 1995, 225-44.

Martínez D.E. Caracterización geoquímica de las aguas de la laguna Mar Chiquita, Provincia de Córdoba. Tesis Doctoral (inédita), Universidad Nacional de Córdoba, 1991, 274 pp.

Martínez D.E., Gómez Peral M., Maggi J. Caracterización geoquímica y sedimentológica de los fangos de la laguna Mar Chiquita, Provincia de Córdoba: aplicación del análisis multivariante. *Rev. Asoc. Geol. Argentina*, 49, 1994, 26-38.

Norma de Ensayo E18-89. Método de campaña para la determinación de sales solubles y sulfatos en suelos, estabilizados y suelos granulares. Dirección Nacional de Vialidad, 1989, 119-123.

Norma NLT-116/59. Determinación cuantitativa de los carbonatos en los suelos por el método del calcímetro de Bernard. 4 pp.

Pasquini A. I., Lecomte K. L., Piovano E. L., Depetris P. J. Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International* 158, 2006, 127-139.

Piovano E. L., Ariztegui D., Bernasconi S. M., McKenzie J.A. Stable isotopic record of hydrological changes in subtropical Laguna Mar Chiquita (Argentina) over the last 230 years, *The Holocene* 14, 2004a, 525-535.

Piovano E. L., Larizzatti F. E., Fávoro D. I. T., Oliveira S. M. B., Damatto S. R., Mazzilli B. P., Ariztegui D. Geochemical response of a closed-lake basin to 20th century recurring droughts/wet intervals in the subtropical Pampean Plains of South America. *J. Limnol.*, 63(1), 2004b, 21-32.

Piovano E.L., Ariztegui D., Damatto Moreira S. Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (Central Argentina): A sedimentary model for a highly variable saline lake. *Sedimentology*, 49, 2002, 1371-1384.

Raphaël, S., Sarkar, S. L. y Aitcin, P. C. Alkaline-aggregate reactivity – Is it always harmful? En: K. Okada, S. Nishibayashi y M. Kawamura (Eds.), *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, 1989, 809-814. Kyoto, Japan.

Reati G. J., Florin M., Fernandez G. J., Montes C. The Laguna Mar Chiquita (Cordoba, Argentina): a little known, secularly fluctuating, saline lake, *International Journal of Salt Lake Research* 5, 1997, 187-219.

SRH - Subsecretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba: http://web2.cba.gov.ar/obraspublicas/obras_publicas/agua_saneamiento/marchiquita/laguna_de_mar_chiquita.htm

Troin M., Vallet-Coulomb Ch., Sylvestre F., Piovano E. Response of lake Mar Chiquita in Argentina to climate change: data analysis and application of a lake model, *Proceeding 13th IWRA World Water Congress*, 2008, Montpellier, France, 11 p.

Walker H. N., Lane D. S., Stutzman P. E. *Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete: A Petrographic Manual*, Federal Highway Administration, 2006, 333 pp.

Ying-yu L. y Qui-dong, W. The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure, *ACI SP 100-98*, American Concrete Institute, 1988, 1915-1943.