

PETROGRAFÍA DEL HORMIGÓN ENDURECIDO: ESTUDIO DE UN PAVIMENTO CON PATOLOGÍAS

P. J. MAIZA y S. A. MARFIL***

Universidad Nacional del Sur. San Juan 670. 8000 Bahía Blanca.

TE: 0291-4595184. FAX: 0291-4595148.

e-mail:smarfil@criba.edu.ar.

RESUMEN

Se estudiaron, con microscopio de polarización, testigos de hormigón provenientes de un pavimento que presentaba evidencias de deterioro. El objetivo fue determinar la patología que afectó a la obra y las causas que la provocaron. Para ello se estudiaron los materiales que integran el hormigón. Las especies deletéreas presentes son esquistos argilizados, cuarcitas de grano fino y vulcanitas alteradas. El mortero se presenta fuertemente fisurado, la textura ha sido totalmente obliterada. Son abundantes los bordes de reacción en los contactos clasto - cemento. Se identificó ceolita como material de neoformación en el interior de cavidades y rellenando microfisuras. Este material fue confirmado por difracción de rayos X y SEM - EDAX.

Por las características texturales observadas y los materiales de neoformación, se concluyó que el deterioro se debió al desarrollo de la reacción álcali - sílice.

Introducción

El conocimiento detallado de la mineralogía y petrografía de los agregados finos y gruesos que se utilizarán en la elaboración del hormigón de cemento portland es de importancia en la vida útil de la obra a realizar. La identificación de los componentes mineralógicos, especialmente los deletéreos frente a la reacción álcali - sílice, presencia de minerales metaestables y productos de alteración, darán pautas sobre los recaudos que se deberán tomar al momento de elaborar el hormigón y en última instancia aprobar o desechar el material analizado (1, 2).

Por otra parte, el estudio petrográfico del hormigón endurecido, desde el análisis de la muestra de mano con estereomicroscopio hasta el examen sobre secciones delgadas, permite determinar a los constituyentes del agregado, estado del mortero, presencia de microfisuras, grado de deterioro, productos de neoforma-

(*) Profesor Dpto. de Geología.
Investigador Independiente CONICET.
(**) Investigador Adjunto CIC.

ción, fenómenos de borde entre los agregados y estado de la pasta. Estos estudios se complementan con otras técnicas tales como difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y EDAX (3, 4). En el estudio de hormigones que presentan patologías atribuidas a la reacción álcali - sílice es de vital importancia el muestreo en obra a fin de estudiar las variaciones desde la superficie al interior, cerca y lejos de las juntas de dilatación, proximidades del suelo, características químicas del sustrato y del agua, etc.

Objetivos

El propósito del presente trabajo es estudiar las causas del deterioro de un pavimento de hormigón, liberado al tránsito hace 14 años, ubicado al norte de la Prov. de Buenos Aires. Los primeros indicios de reacción se manifestaron hace aproximadamente 10 años, como microfisuramiento, estrechamiento de las juntas y abovedamientos puntuales, sin ningún tipo de ubicación preferencial. Para determinar las causas de las patologías, se realizó un estudio petrográfico de los agregados que lo componen a fin de identificar especies deletéreas responsables de la degradación. Se estudió el estado de la pasta y la presencia de materiales de neoformación para determinar la patología que afecta a la obra de arte estudiada.

Metodología

Se utilizó un sistema microscópico Olympus, con procesador de imágenes integrado con un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT; microscopio petrográfico Olympus trinocular B2-UMA, con una cámara de video Sony 151 A incorporada, monitor de alta resolución y procesador de imágenes Image Pro Plus versión 3.1. Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 35 CP equipado con una sonda EDAX, DX 4, de ventana ultradelgada, con un rango de análisis elemental desde $Z = 5$ (B) hasta $Z = 92$ (U) y un difractómetro de rayos X Rigaku, D-max III-C, con radiación de Cu Ka y monocromador, con 35 Kv y 15 mA, computarizado.

1. **Estudio con estereomicroscopio:** El examen cuidadoso del hormigón con estereomicroscopio permite definir las características del mortero, relación contacto agregado - cemento, presencia de microfisuras, estado de conservación de la pasta, desarrollo de productos de neoformación tales como calcita, portlandita, etringita, yeso, ceolitas, etc. Los productos de la reacción álcali - sílice (ceolitas) no son identificables con este método ya que constituyen materiales masivos sin desarrollo de cristales que puedan ser visibles con estereomicroscopio, debido a su pequeño tamaño. Sin embargo esta metodología es de gran ayuda para separar el material para su posterior análisis por otras técnicas tales como difracción de rayos X y SEM-EDAX. El carbonato de calcio puede presentarse tanto en forma masiva como desarrollando cristales característicos. Con respecto a los agregados es posible visualizar grado y tipo de alteración, en especial determinar la existencia de fenómenos de borde, roncas de reacción, etc.

2. **Microscopía de polarización:** El estudio de hormigón endurecido en secciones delgadas permite el análisis detallado de la composición petrográfico - mineralógica de los agregados gruesos y finos que lo constituyen y la determinación de las características de la pasta, presencia de fisuras, procesos de lixiviación o corrosión de las especies mineralógicas lábiles, cristalización de especies de neoformación y alteración de sus componentes.
- 2.a **Identificación de los minerales y rocas** que constituyen los agregados en el hormigón: Se determinan los componentes principales y accesorios del hormigón y los que puedan provocar daño en el material objeto de estudio. En el caso que se haya presentado alguna patología tal como puede ser el desarrollo de la reacción álcali - sílice permitirá concluir cuales fueron las especies responsables del deterioro.
- 2.b **Microfisuramiento:** Podrá definirse si las microfisuras se encuentran dispersas en la pasta o tienen continuidad y afectan también a los agregados. En el primer caso corresponden al fisuramiento propio del fraguado del hormigón, no constituyen evidencias del desarrollo de patologías, son generalmente muy finas y se encuentran vacías. En cambio si tienen continuidad, afectan a los clastos de los agregados, son en general más anchas que las anteriores y están rellenas por un material que puede ser más isotrópico y/o anisótropo, se asume que el hormigón presenta signos de deterioro.
- 2.c **Contacto agregado - pasta:** En hormigones sanos el contacto es neto, mientras que si el hormigón presenta signos de deterioro se observan bordes de reacción, contactos de carie, en algunos casos los clastos se presentan separados de la pasta, es frecuente observar los productos de reacción desarrollados en los bordes de los clastos.
- 2.d **Estado de la pasta:** En hormigones sanos la pasta se presenta homogénea, las cavidades de aire accidental se encuentran vacías, mientras que, en hormigones que presentan deterioro las cavidades de aire accidental se encuentran parcial o totalmente ceolitizadas y es común el desarrollo de ettringita secundaria.
3. **Difractometría de rayos X:** Es una técnica complementaria de gran ayuda en la identificación de los materiales cristalinos de neoformación. Estos son separados en la primera etapa del estudio bajo estereomicroscopio para su análisis por este método. Permite definir con seguridad las especies cristalinas presentes. En el caso de productos masivos no identificados con estereomicroscopio, pueden ser claramente determinados por DRX, tal es el caso de calcita, portlandita, ettringita y ceolitas. Es condición imprescindible su estado cristalino. Esta técnica también resulta de utilidad en la identificación de arcillas en el agregado sobre todo arcillas expansivas del grupo de la montmorillonita.

4. **Microscopía electrónica de barrido y EDAX:** Los productos de neoformación separados con estereomicroscopio son observados con microscopio electrónico de barrido. Con esta técnica es posible observar la morfología de los materiales y analizar su composición química con EDAX.

Resultados

Observaciones con estereomicroscopio

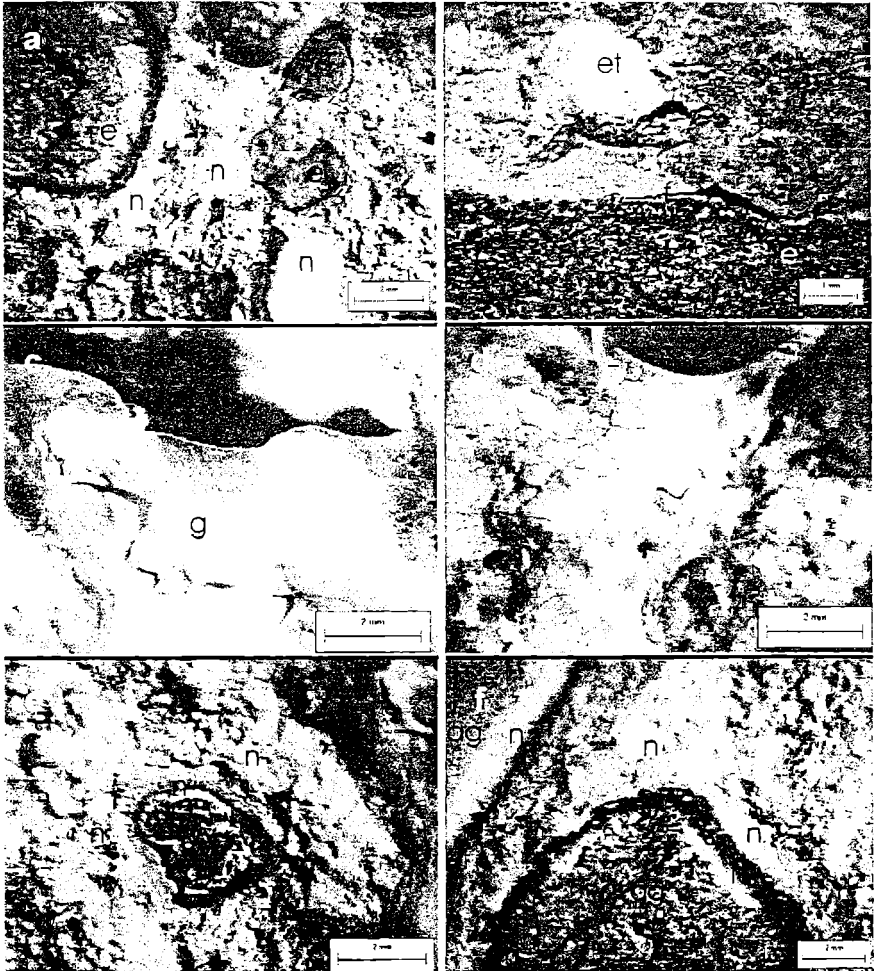
Los testigos de hormigón fueron extraídos en los sectores más afectados y se seleccionaron seis para este estudio, en los que se destaca un macrofracturamiento intenso. Los clastos del agregado grueso, con excepción de las rocas graníticas, desarrollan marcadas coronas de reacción con cristalización en la parte interna y externa de productos de neoformación, son abundantes los senos de corrosión, zonas de disolución y algunos están afectados por microfisuramiento. Se observaron clastos, en especial del agregado grueso totalmente alterados lo que hace difícil su identificación. Algunos sectores de la pasta y el mortero se encuentran deteriorados por los exudados blanquecinos cristalinos y fibrosos atribuidos a ceolitas y ettringita, las cavidades de aire atrapado están rellenas total o parcialmente por productos de neoformación. Estos materiales fueron separados para su estudio por DRX y SEM - EDAX. Los productos de reacción se desarrollan principalmente en el contacto agregado grueso - mortero, aunque también es frecuente observarlos relacionados al agregado fino.

La figura 1, a) muestra clastos de esquistos (e) con sus bordes totalmente alterados tanto dentro de los clastos como en el mortero. En la pasta se observa abundante material de neoformación (n). 1.b) corresponde a un clasto de esquistos (e) relacionado a una microfisura (f) y ettringita (et) desarrollada en el interior de una cavidad de aire atrapado. En la figura 1.c) se muestra una masa criptocristalina de gel seco (g) que fluyó a través de una fractura originado en un clasto de esquistos. Este material se analizó por SEM-EDAX. 1.d) es un detalle del producto de neoformación que afecta al mortero. Se observan grietas de desecación desarrolladas como consecuencia de la deshidratación del gel. La figura 1.e) corresponde a un clasto de vulcanita vítrea afectada por el proceso de reacción. 1.f) es un detalle del borde de un clasto de agregado (ag) con corona de reacción y desarrollo de abundantes productos de neoformación (n) que afectan al hormigón.

Estudio con microscopio de polarización sobre secciones delgadas

El agregado grueso está constituido en forma predominante por esquistos (micáceos y cloríticos), (36 %), rocas graníticas (25 %) y cuarcitas (30 %). En estas últimas, el cuarzo es de grano fino y presenta extinción ondulante, el valor del ángulo de extinción ondulante promedio es de 12° con un desvío standard de 5.4. En forma subordinada se identificaron clastos de vulcanitas vítreas ácidas (9%). El vi-

Figura 1: Observaciones con Estereomicroscopio



a. Clastos de esquistos con sus bordes corroídos (e). En la pasta se observa abundante material de neoformación (n); b. Esquisto despegado del mortero (e) a través de una fisura (f). Cavity de aire entrampado rellena ettringita (et) en un sector afectado por la reacción; c. Material predominantemente amorfo originado por la deshidratación del gel (g) producido durante la reacción; d. Grietas de desecación desarrolladas como consecuencia de la deshidratación del gel. e. Vulcanita vítrea (vv) afectada por la reacción con claras evidencias de argilización progresiva dentro de un mortero muy alterado con abundante material de neoformación (n). f. Clasto del agregado (ag) afectado por la reacción. El material de neoformación (n) invade progresivamente su masa y destruye la textura del mortero.

drio en general se presenta fresco aunque en algunos sectores ha sufrido intensos procesos de alteración, principalmente desvitrificación generando importantes cantidades de minerales arcillosos.

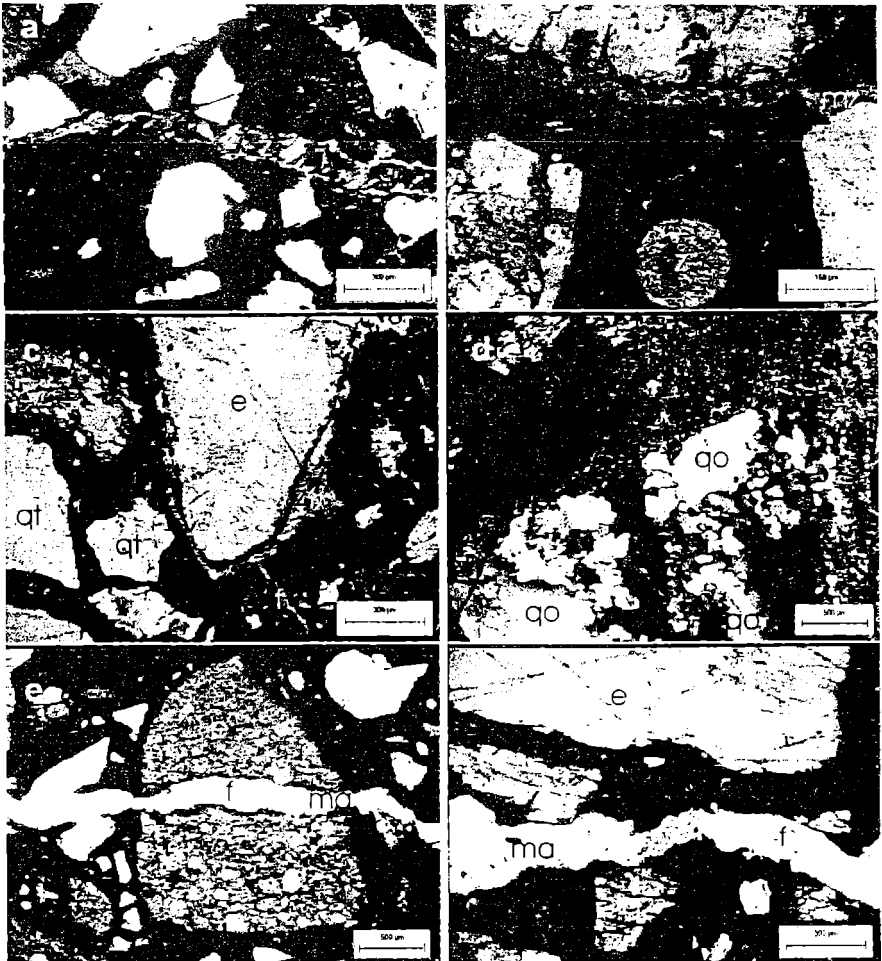
El agregado fino es una arena de composición litológica similar a la del agregado grueso a la que se le agregan clastos aislados de cuarzo, feldespato y mica.

Los contactos de los esquistos con el mortero son difusos, afectados por procesos de degradación. Estos fenómenos son más evidentes en los clastos de menor tamaño, en algunos casos llegan a desaparecer totalmente quedando el fantasma del mismo. Se desarrolla un reemplazo total por una masa criptocristalina a amorfa en la que sólo se conservan pequeños clastos de cuarzo con extinción ondulante del clasto original.

El mortero se presenta fuertemente ceolitizado con abundantes óxidos e hidróxidos de hierro. Se observaron marcados senos de corrosión en especial en los clastos de cuarzo con extinción ondulante. Las microfisuras afectan a la pasta y a algunos clastos del agregado, a veces alcanza dimensiones considerables. En general se encuentran selladas y rellenas con un material anisótropo de baja birrefringencia adjudicado a ceolita. Son abundantes las cavidades de aire atrapadas ceolitizadas.

En la figura 2, a) se muestra una fractura ceolitizada donde los cristales de ceolita (z) crecen perpendiculares a la microfisura. Se muestran además clastos de rocas graníticas, esquistos y cuarzo con extinción ondulante (qt). La figura 2.b muestra clastos del agregado grueso, rocas graníticas (g) y esquistos (e), separados del mortero por una microfisura ceolitizada (mz). En la parte inferior se observa una cavidad de aire accidental colmatada por ceolita (z) y un clasto de esquistos (e) de grano fino con un sector donde la textura granular ha sido afectada. Todos los clastos del agregado grueso muestran evidencias de corrosión y el agregado fino se presenta enmascarado dentro del mortero sin posibilidad de identificación. En la figura 2.c se observa un clasto de esquistos (e) con borde de reacción a partir del cual se desarrolla una zona ceolitizada (z) y una microfisura (f) que afecta al mortero. Además se muestran clastos de cuarzo tensionado, con extinción ondulante (qt) dentro de un mortero cuya textura ha sido obliterada. La figura 2.d corresponde a un clasto de cuarcita constituida por cuarzo de grano fino con extinción ondulante (qo) con su borde exterior totalmente obliterado con marcados senos de corrosión, microfisuramiento y destrucción de la textura del mortero. 2.e muestra un clasto de metamorfita (e) fracturado, la fisura (f) afecta también a la pasta. La textura del mortero ha sido totalmente obliterada. En la figura 2.f se muestra una fisura (f) donde ha comenzado a cristalizar ceolita (z), (luz paralela).

Figura 2: Fotomicrografías con Microscopio de polarización



a. Fractura rellena por cristales tabulares transversales de zeolita (z); b. Microfisura ceolitizada (mz) y cavidad de aire accidental ceolitizada (z) en un mortero con la textura original obliterada. Los clastos del agregado grueso están muy alterados; c. Clasto de esquisto (e) con su contorno ceolitizado (z) y una interfase amorfa. Las microfisuras (f) están colmadas por ceolitas y el mortero presenta una textura afectada por la reacción. Es abundante el cuarzo tensionado (qt). d. Clastos de cuarcita con extinción ondulante (qo), correspondientes al tensionamiento original con importantes evidencias de reacción, contactos de carie, bordes reaccionados y destrucción del mortero. e. La microfisura (f) afecta a un esquisto (e), al mortero y a los clastos del agregado fino simultáneamente. Se halla colmada por material amorfo (ma). f. El material amorfo (ma) que rellena la microfisura (f) cristaliza en forma localizada como zeolita (z). El agregado grueso está constituido principalmente por esquistos (e) y rocas graníticas (g).

Difractometría de rayos X

El material de neoformación desarrollado en los bordes de los clastos, sobre su superficie y en el mortero fue analizado por DRX. Se determinó la presencia de ceolita K-I. (Su espectro es semejante al mencionado en la ficha ICDD 18-988) y ettringita con cantidades subordinadas de portlandita y calcita. El resto de las reflexiones observadas corresponde a cuarzo y feldespato del agregado. Es abundante el material amorfo.

Se analizó además el producto de alteración de algunos clastos de esquistos identificándose las reflexiones correspondientes a arcilla del tipo montmorillonita (expansivas y lábiles).

Microscopía electrónica de barrido - EDAX

Se estudiaron los productos desarrollados en el interior de cavidades formadas por aire accidental, sobre la superficie del hormigón y el desarrollado en los contactos agregado - mortero.

En la figura 3.a (x 780), se muestra un material cristalino acicular, desarrollado en el interior de cavidades de aire accidental y sobre la superficie del hormigón. 3.b corresponde al espectro EDAX de la zona indicada en 3.a. Se identificó S, Al, Ca y O adjudicado a ettringita.

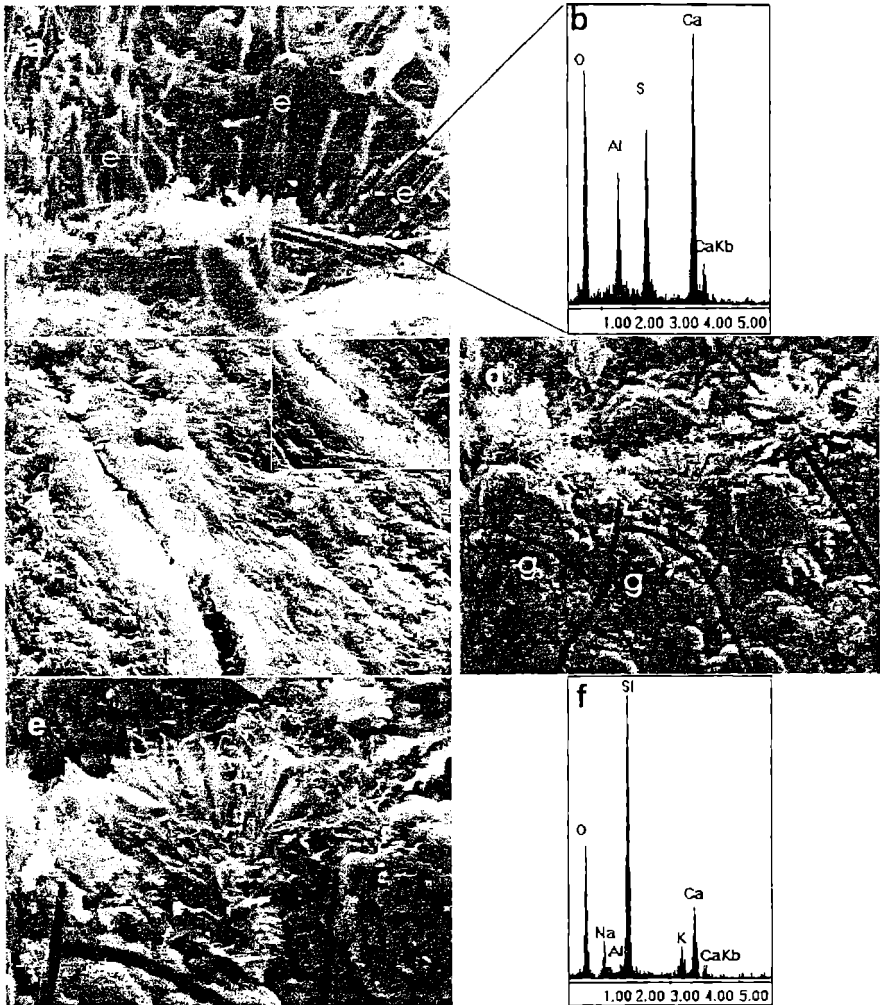
Se analizó un clasto reactivo con desarrollo de coronas de reacción y un material blanco, de aspecto esponjoso en el interior del clasto. Este último se muestra en la figura 3.c (x 1200), el producto blanco que se observa en la fisura (detalle en la parte superior de la fotomicrografía (x3000)), fue analizado por EDAX, se identificó Si, O, Ca y Al adjudicado a ceolita.

El material desarrollado en la corona de reacción se muestra en la figura 3d. (x1500), se trata de un gel con grietas de desecación, sobre el que se han desarrollado cristales cuyo detalle se muestra en la figura 3.e (x4000). El espectro EDAX (figura 3.f), permitió identificar Si, Al, O, Na, Ca y K, adjudicado a ceolita.

Consideraciones

- En el hormigón estudiado el cuarzo tensionado se presenta tanto en el agregado fino como en el grueso constituyendo principalmente rocas metamórficas (cuarcitas), e incluso rocas graníticas que han sufrido procesos de deformación. Es ampliamente mencionado en la bibliografía que el cuarzo tensionado, microcristalino y de grano fino es considerado potencialmente reactivos frente a la RAS. Su velocidad de reacción es muy lenta por lo que en general no es detectado en los métodos de ensayo convencionales, generalmente deben seguirse los ensayos más tiempo que el establecido en las normas. Con el método de ensayo químico la cantidad de sílice disuelta determinada es baja. De allí la importancia de la identificación de estos materiales con microscopio de polarización ya que permite alertar sobre su potencial reactividad.

Figura 3: Microscopía Electrónica de Barrido - EDAX



a. Ettringita (e) cristalizada en el interior de cavidades de aire entrampado; b. EDAX del sector indicado en 3.a; c. Producto de reacción desarrollado en el interior de un clasto reactivo; d. Corona de reacción en el contacto agregado-mortero. Se observa un gel (g) con grietas de desecación, sobre el que se ha cristalizado un material cuyo detalle se muestra en la figura e. Analizado por EDAX se identificó Si, Al, Ca, Na y K adjudicado a ceolita (Figura 3 f).

• El vidrio volcánico es un material altamente dañino en el hormigón, cuando está presente en contenidos superiores al 3 %, sometido a condiciones de elevada humedad y temperatura y utilizado con cementos de alto contenido de álcalis. En las muestras analizadas se presenta como vidrio fresco, en especial formando parte del agregado fino, y constituyendo la pasta de rocas volcánicas vítreas tanto en el agregado fino como en el grueso. En este último se presenta alterado principalmente a minerales arcillosos del grupo de la montmorillonita.

• El examen petrográfico permite una clara identificación de estas especies. Cuando se realiza el estudio petrográfico de un agregado deben detallarse los minerales de alteración presentes. No debe hablarse genéricamente definiendo por ejemplo vulcanitas ya que éstas pueden contener o no vidrio volcánico y si lo tienen, puede estar fresco o alterado y su comportamiento es totalmente distinto.

Conclusiones

1. Los agregados utilizados en la elaboración del hormigón estudiado contienen especies deletéreas. Estas son: vidrio volcánico fresco (2 %) y alterado a minerales arcillosos de grupo de la montmorillonita (4 %), y cuarzo tensionado (con extinción ondulante) (30 %).

2. Los testigos del pavimento estudiado muestran importantes signos de deterioro tales como microfisuras desarrolladas en la pasta que afectan a los agregados, bordes de reacción, contactos de caries, productos de reacción en el interior de microfisuras, en cavidades de aire entrampado, en contactos agregado - mortero y ceolitización de la pasta.

3. Los productos de neoformación fueron identificados como ceolita K-I y ettringita.

4. Por las características expuestas en los puntos anteriores se concluye que el pavimento ha sido deteriorado como consecuencia del desarrollo de la reacción álcali-sílice. Esta se ha desarrollado por la presencia de vidrio volcánico y cuarzo tensionado en el agregado, alta disponibilidad de álcalis y condiciones del medio ambiente favorable para el desarrollo de la reacción tales como elevada humedad y temperatura.

5. A partir de la aparición de las primeras evidencias del desarrollo de la RAS, el proceso de deterioro se acelera notablemente como consecuencia del aumento de la porosidad y permeabilidad del hormigón, haciéndose muy efectiva la circulación del agua, su poder lixiviante y los procesos relacionados con ella.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As. y a la Universidad Nacional del Sur por el apoyo brindado y al Sr. Rodolfo C. Salomón por la compaginación de las fotomicrografías.

Referencias

1. S. A. Marfil y P. J. Maiza. "Los agregados gruesos utilizados en la zona de Bahía Blanca (Prov. de Bs. As.), en relación con la reacción álcali agregado". Congreso Internacional de Ingeniería Estructural y Tecnología del Hormigón. Córdoba. Memorias. I, 1-10. (1993).
2. P. J. Maiza y S. A. Marfil. Principales yacimientos de arena, canto rodado y piedra partida, utilizados en la construcción en la zona de Bahía Blanca, Prov. de Buenos Aires. Primer Seminario de Tecnología del Hormigón en la Vivienda del Mercosur. Memorias. Santa Fe. 253-264. (1997).
3. S. A. Marfil y P. J. Maiza. Zeolite crystallization in portland cement concrete due to alkali-aggregate reaction. Cement and Concrete Research. Vol. 23 N° 6. pp 1283-1288. USA. (1993).
4. P. J. Maiza; S. Marfil y C. Milanese. Desarrollo de minerales de neoformación en un pavimento deteriorado por la reacción álcali-sílice. Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía. Vol. 21-A. 136-137. (1998).