

PETROGRAFIA DEL HORMIGON ENDURECIDO AFECTADO POR LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE

S. A. Marfil^{1,2}; P. J. Maiza^{1,3} y R. C. Salomón^{1,4}

¹ Dpto. de Geología - Universidad Nacional del Sur. San Juan 670. 8000 Bahía Blanca.

email: smarfil@criba.edu.ar.

² CIC*. ³ CONICET**. ⁴ CIC***.

RESUMEN

En el presente trabajo se avanza sobre la conveniencia del uso de microscopía en el estudio de hormigones endurecidos, especialmente estereomicroscopio, microscopio de polarización y otros métodos complementarios que permiten conocer la mineralogía y la petrografía de los agregados finos y gruesos que se utilizaron en la elaboración del hormigón y su relación con el material cementiceo. Es de vital importancia conocer la litología de los elementos pétreos, la identificación de especies deletéreas frente a la reacción álcali-sílice, la presencia de minerales metaestables y productos de alteración, tales como reacción con sulfatos, carbonatación, argilización y lixiviación de sus componentes. Además el estudio petrográfico del hormigón endurecido, desde el análisis de la muestra de mano con esteromicroscopio hasta el examen sobre secciones delgadas, permite determinar el estado del mortero, presencia de microfisuras, grado de deterioro y fenómenos de borde entre los agregados y la pasta, elementos fundamentales para calificar a un hormigón endurecido.

Estos estudios se complementan con técnicas tales como difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, EDAX, análisis químicos y otras más específicas, las que complementadas con ensayos físicos, decidirán el estado del hormigón.

Palabras claves: Petrografía - concreto - RAS.

ABSTRACT

This paper reports on the benefits of microscopy use in the study of hardened concrete, especially the stereoscopic microscope, the petrographic microscope and other supplementary techniques that allow the determination of the mineralogy and petrography of fine and coarse aggregates used in concrete, and their relation with the cementitious material. It is of utmost importance to know the lithology of rocky elements, identify deleterious species that lead to the alkali-silica reaction and determine the presence of metastable minerals and alteration products, such as reaction with sulfates, carbonation, argillization and leaching of their components. Moreover, the petrographic study of hardened concrete, from the analysis of cored samples in the stereoscopic microscope to the determination on thin sections, will allow establishing the mortar condition, the occurrence of microcracks, the degree of damage and paste-aggregate interface phenomena, which are fundamental elements to evaluate hardened concrete. These studies are supplemented by techniques such as X-ray diffraction, scanning electron microscopy, EDAX, chemical analyses and other more specific techniques that together with physical tests will help determine the condition of the concrete.

Keywords: Petrography - Concrete - ARS.

*Investigador Adjunto s/d, **Investigador Principal, ***Técnico Asociado

1. INTRODUCCIÓN

Una cantidad cada vez mayor de obras en las que el hormigón es uno de los componentes fundamentales, se hallan afectadas por distintas patologías las que una vez en desarrollo es casi imposible remediarlas y no existen medios para detenerlas. (Léger *et al.*, 1996; Cole *et al.* 1988; Qinhua *et al.* 1997; Marfil *et al.* 2001; Marfil *et al.* 2001a).

Sin dudas, que el estudio previo detallado de sus componentes relacionados con el medio donde se instalará la estructura, si bien no evitaría totalmente el desarrollo de los procesos propios de la maduración y posterior envejecimiento, neutralizaría las reacciones químicas y físicas tempranas, algunas de ellas muy destructivas que acortarán notablemente su vida útil. En el estudio de hormigones que presentan patologías tales como deterioro por la reacción álcali-sílice es de vital importancia el muestreo en obra a fin de evaluar las características superficiales, el estrechamiento de las juntas, aumento de volumen, fracturamiento, desprendimiento de los agregados y todo fenómeno que se considere de interés para su análisis. (Rodrigues 1999; Prezzi 1998; Marfil *et al.* 1993).

Para el estudio de un hormigón endurecido deben seguirse los siguientes pasos:

1. El muestreo y análisis de la obra: Debe ser realizado por el profesional con experiencia en este tipo de trabajos.
2. Observación de las muestras con estereomicroscopio: En esta etapa se visualiza el estado general de los testigos, desarrollo de fisuras, manchas blanquecinas, cristalización de sales, presencia de geles, etc. En el caso de observar productos de neoformación se procederá a su separación para su posterior estudio por otras técnicas analíticas específicas.
3. Estudio con microscopio de polarización: Se confeccionan las secciones delgadas necesarias. En ellas se identifican los agregados gruesos y finos, las alteraciones, presencia de especies deletéreas, reacción de borde entre el agregado y la pasta, estado del mortero y presencia de microfisuras.
4. Difractometría de rayos X: Se utiliza en el análisis de productos de neoformación, minerales de alteración y composición del agregado separados con el estereomicroscopio. Se identificarán todos los materiales cristalinos tales como ettringita, carbonatos, sulfatos, aluminosilicatos (ceolitas), portlandita, entre otros.
5. Microscopía electrónica de barrido (SEM): Permite estudiar en detalle los productos de reacción, basándose en las morfologías de las especies cristalinas desarrolladas como consecuencia de la reacción álcali-sílice, analizar las superficies de las especies deletéreas, interfase, interfase pasta-agregado, etc.
6. EDAX: Permite determinar los componentes químicos de los productos observados en el SEM y calcular su composición.

2. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

El examen cuidadoso del hormigón en esta primera etapa es de fundamental importancia ya que permite definir el estado general del hormigón, grado de deterioro, características de la fisuración, presencia de exudados, cambios de volumen, estran-

gulamamiento de las juntas, desprendimientos de determinados sectores y la relación con su emplazamiento.

Contribuye notablemente disponer de testigos del hormigón, ya que permite la determinación visual de las características del mortero, de la interfase pasta-agregado, presencia de fisuras, estado de conservación de la pasta, desarrollo de productos de neoformación (carbonato de calcio, portlandita, ettringita, yeso, ceolitas, etc.) y su extracción basándose en el tipo cristalino de cada especie apoyándose con estereomicroscopio para la observación de los detalles.

Algunos de estos materiales son fácilmente identificables por su desarrollo cristalino, tal es el caso de la ettringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Forman cristales blandos, muy finos, aciculares, los que a veces crecen como prismas cortos. Se desarrollan principalmente en el interior de cavidades formadas por aire atrapado, como se muestra en la fotomicrografía 1 (Fm 1). Si el hormigón se encuentra en un grado avanzado de deterioro cristaliza en el interior de microfisuras, tapiza la superficie, comúnmente en espacios abiertos (Fm 2).

Los productos de la reacción álcali-sílice (ceolitas) no son identificables con este método ya que constituyen materiales masivos sin desarrollo de cristales visibles con estereomicroscopio, debido a su pequeño tamaño (Fm 3). 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 en cristales característicos de calcita. En algunos casos dependiendo del medio (pH, presencia de cationes libres), también pueden cristalizar otros carbonatos. En la Fm 4 se muestra la superficie de un testigo de hormigón con un marcado proceso de carbonatación.

Con respecto a los agregados es posible determinar el grado y tipo de alteración, en especial la presencia de especies mineralógicas potencialmente deletéreas u otras que por sus características morfológicas podrían ser reactivas. En las Fm 5 y Fm 6 se observan clastos de rocas metamórficas (esquistos verdes) y areniscas silíceas, con bordes de reacción que obliteran la interfase pasta-agregado.

En la Fm 7 se observa un testigo de hormigón con claras evidencias de reacción desarrolladas tanto en los clastos del agregado grueso como en el mortero. Este último presenta un importante deterioro, reflejado principalmente en los poros de aire atrapado y poros del hormigón, donde el material de neoformación colmata a los huecos o los rellena parcialmente.

La Fm 8 muestra un hormigón con marcado microfisuramiento característico de la reacción álcali-sílice.

3. ESTUDIOS CON MICROSCOPIO DE POLARIZACIÓN

El estudio del hormigón endurecido en secciones delgadas permite el análisis detallado de la composición petrográfico-mineralógica de los agregados gruesos y finos, las alteraciones que presentan y la determinación de las características de la pasta, porosidad, contenido de aire intencionalmente incorporado, presencia de fisuras y grado de deterioro.

Petrografía del hormigón endurecido afectado por la reacción álcali-sílice...

El estudio con microscopio de polarización se puede dividir en dos etapas:

- 3.1 Estudio petrográfico de los agregados.
- 3.2 Estudio de la pasta y de la interfase pasta-agregado.

3.1 Estudio petrográfico de los agregados

La identificación de los minerales y rocas que constituyen los agregados en el hormigón estudiado es de vital importancia para determinar si existen componentes potencialmente deletéreos que puedan provocar daño en el material objeto de estudio. En el caso que se haya presentado alguna patología, como puede ser el desarrollo de la reacción álcali-sílice permitirá concluir cuales fueron las especies responsables del deterioro.

En la Fm 9 se observa clastos de cuarzo con extinción ondulante. Es ampliamente mencionado en la bibliografía que el cuarzo tensionado, microcristalino y de grano fino son considerados 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 tales como barras de mortero, (IRAM 1637-ASTM C-227) método acelerado (ASTM C-9 P214), (en general, si se aplican, debe extenderse el tiempo del ensayo, más que el establecido en la norma). Mientras que en el método de ensayo químico (IRAM 1650-ASTM C-289), la cantidad de sílice disuelta determinada es baja. De allí la importancia del análisis petrográfico, permite la identificación de estos materiales con microscopio de polarización, podría alertar sobre su potencial reactividad y permitiría fijar pautas que condicionen los ensayos complementarios.

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. En las rocas sedimentarias (areniscas silíceas), la matrix por lo general es criptocristalina o amorfa y por lo tanto, altamente lixiviable en el hormigón.

El vidrio volcánico presente en los agregados también es un material potencialmente deletéreo en hormigones con elevado contenido de álcalis en su composición. Su presencia es fácilmente detectable por este método ya que se comporta como una sustancia amorfa. Se puede presentar fresco, en especial formando parte de los agregados finos (Fm 10), o constituyendo la pasta de rocas volcánicas vítreas. En este último caso puede presentarse fresco o alterado principalmente a minerales arcillosos del grupo de la montmorillonita, como se muestra en la Fm 11. Si bien el vidrio volcánico finamente dividido puede ser utilizado como material puzolánico, el tamaño de partícula de los agregados hace que su comportamiento sea potencialmente reactivo cuando el contenido de álcalis en el hormigón es elevado.

La calcedonia, tridimita y variedades de sílice criptocristalinas son altamente reactivas. Son frecuentes de encontrar como clastos aislados de areniscas o como fragmentos de rocas principalmente de origen volcánico (riolitas, riodacitas, dacitas). Abundan en las crustificaciones superficiales de cantos rodados y agregados finos, individualmente o asociados a procesos de carbonatación y silicificación.

Cuando se realiza el estudio petrográfico de un agregado deben identificarse sus minerales de alteración. No se debe definir genéricamente, por ejemplo vulcanitas, ya que éstas pueden contener o no vidrio volcánico y si lo tienen, puede estar fresco o alterado. En la Fm 12, se observa un hormigón donde en el agregado fino predominan las rocas volcánicas básicas con textura intergranular. Las tablillas de plagioclasa encierran cristales de piroxeno, principalmente augita, en los espacios intergranulares. Hay vidrio relíctico. Son abundantes los minerales opacos. Entre los espacios intergranulares es frecuente observar áreas muy alteradas donde se destaca la presencia de montmorillonita, reemplazando masas vítreas. Con estas características la roca es calificada como reactiva.

3.2 Estudio de la pasta y de la interfase pasta-agregado

Una vez estudiadas las características petrográfico-mineralógicas de los agregados, se evalúan las características del mortero. Se sugiere tener en cuenta las siguientes características:

Microfisuramiento: Debe determinarse 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 por contracción por secado, son generalmente muy finas y se encuentran vacías (Fm 13). En cambio si estas fracturas tienen continuidad, afectan a los clastos de los agregados, (Fm 14) son en general más anchas que las anteriores y están rellenas por un material que puede ser isótropo y/o anisótropo (Fm 15), el hormigón presenta signos de reacción. El producto desarrollado en el interior de las fracturas corresponde a ceolitas identificadas por sus propiedades ópticas, especialmente bajo color de interferencia, bajo índice de refracción, elongación positiva, entre otras. En la Fm 16 se muestra una microfisura rellena por un material amorfo (gel) que ha comenzado a cristalizar dando lugar a la formación de ceolitas (z).

Interfase pasta-agregado: En hormigones sanos el contacto es neto, (Fm 17) mientras que si el hormigón presenta signos de deterioro, se observan bordes de reacción (Fm 18) contactos de carie, (Fm 19) en algunos casos los clastos se presentan separados de la pasta y es frecuente observar productos de reacción desarrollados en los bordes de los clastos. En la Fm 20 se muestra un clasto de cuarzo tensionado con desarrollo de ceolitas en su borde.

Estado de la pasta: En hormigones sanos la pasta se presenta homogénea (Fm 21), los poros de aire se encuentran vacíos, (Fm 22), mientras que en hormigones que presentan deterioro, los poros de aire se encuentran parcial o totalmente rellenos con ettringita (Fm 23 y 24). La Fm 25 muestra un detalle de un poro con ettringita. Si el proceso de degradación se encuentra en estado avanzado es frecuente la ceolitización de la pasta (Fm 26 y 27). En general, este proceso va acompañado por una abundante carbonatación en la pasta (Fm 28).

4. DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X

La difracción de rayos X es una técnica de gran ayuda en la identificación de los materiales de neoformación. Estos son separados en la primera etapa del estudio

Petrografía del hormigón endurecido afectado por la reacción álcali-sílice...

bajo estereomicroscopio, agrupando especies con características mineralógicas semejantes ya que cuanto más simple sea la muestra, más posibilidades de éxito tendrán en la identificación.

Aún en mezclas, permite identificar con seguridad las especies presentes. En el caso de productos masivos, no identificados con estereomicroscopio, son claramente determinados por DRX, tal es el caso de calcita, portlandita, ettringita y ceolitas. La condición principal es que deben presentarse en estado cristalino. Para casos especiales deberá recurrirse a métodos de concentración para eliminar incógnitas (distintas densidades, características magnéticas, morfologías que provoquen diferencias físicas, etc.). El principal problema en la determinación de productos de reacción, en especial ceolitas y ettringita, es la escasa proporción en que se encuentran. La separación de material puro y en cantidad suficiente se hace dificultosa. En general en los espectros que se obtienen aparecen las reflexiones de cuarzo y feldespato correspondientes a los agregados ya que no es posible eliminarlos en el proceso de separación.

En la figura 1 se muestra un difractograma de ettringita, asociado con portlandita y calcita, el resto corresponde al cuarzo y feldespato del agregado. En la figura 2 se muestra un espectro correspondiente al producto de la reacción álcali-sílice. Es una ceolita del grupo de la clinoptilolita.

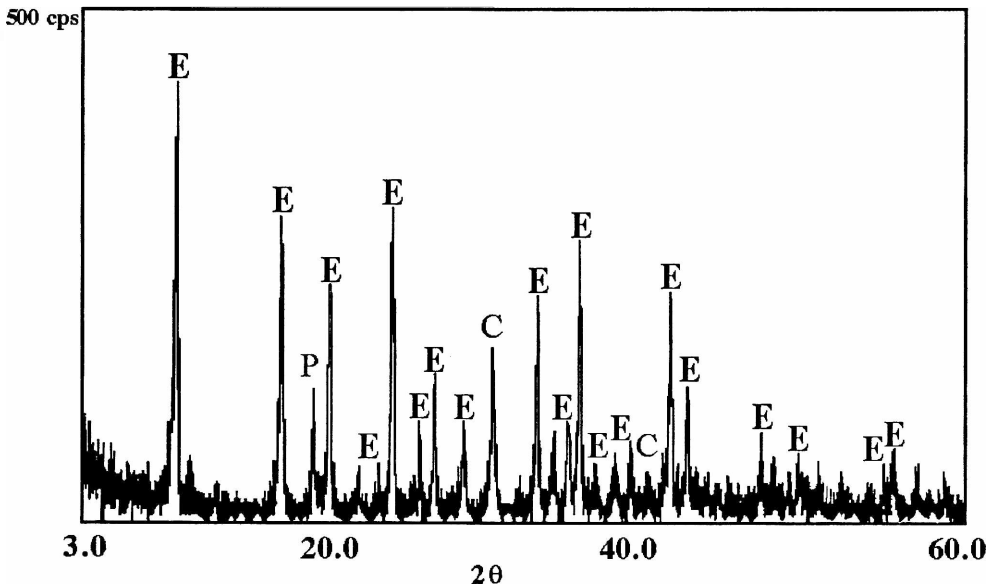


Figura 1. Difractograma de rayos X de ettringita (E), asociada con portlandita (P) y calcita (C).

Esta técnica también resulta de utilidad en la identificación los minerales de alteración de los agregados, especialmente de las arcillas. Determinar la presencia de estas últimas, en especial las del grupo de la montmorillonita, es muy importante

debido a su capacidad de intercambio catiónico, propiedades expansivas e inestabilidad en el medio.

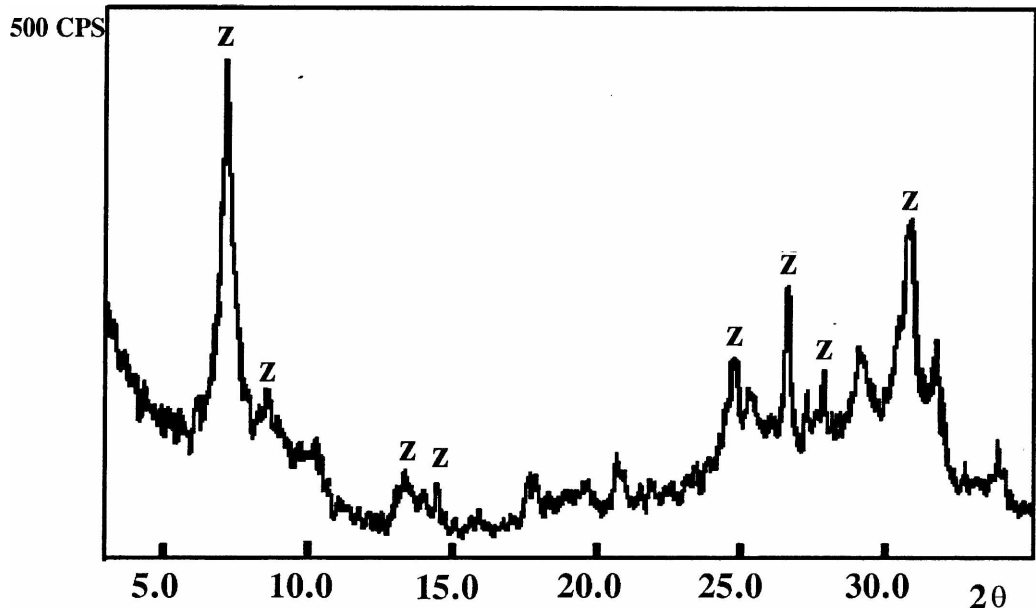


Figura 2. Difractograma del producto de la reacción álcali-sílice (RAS) separado de un hormigón deteriorado. (Z) ceolita del grupo de la clinoptilolita.

En primer lugar se estudia la muestra total. Posteriormente se le elimina la fracción clástica y se dispersa el material con ultrasonido. Luego se decanta en cilindrobureta durante 2 horas, se extrae y se extiende sobre portamuestra de vidrio. Se seca a 40 °C y se irradia en condiciones normales. Si se comprueba la presencia de reflexiones en 14/15 Å, se tratará la muestra con etilen glicol. Para ello se deja en atmósfera saturada durante 24 horas, con el propósito de determinar la capacidad de hinchamiento. Si el hinchamiento se manifiesta (a 16-18 Å) se está en presencia de una smectita, sino será una clorita, aunque también podría ser un interestratificado.

5. MICROSCOPIA 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.

La ettringita se presenta en cristales fibrosos asociada frecuentemente a cristales hexagonales de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), (Fm 29, 30 y 31). Los espectros de EDAX característicos se muestran en la figura 3 (S, O, Al y Ca).

La ceolita se presenta desde muy pobremente cristalizada, en forma masiva o de gel hasta con hábito cristalino característico (Fm 32, 33 y 34). La composición química

Petrografía del hormigón endurecido afectado por la reacción álcali-sílice...

de las ceolitas es variable debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico. Son aluminosilicatos hidratados de Ca, K y/o Na (figura 4).

Los espectros de EDAX muestran desde ceolitas cálcicas a sódico - potásicas.

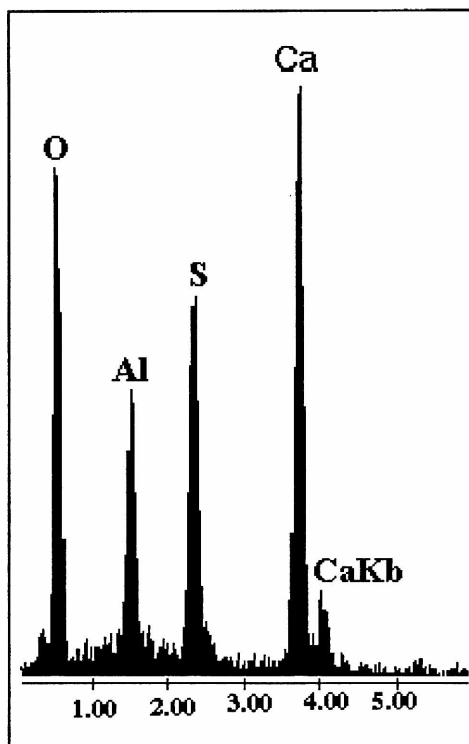


Figura 3. EDAX de ettringita

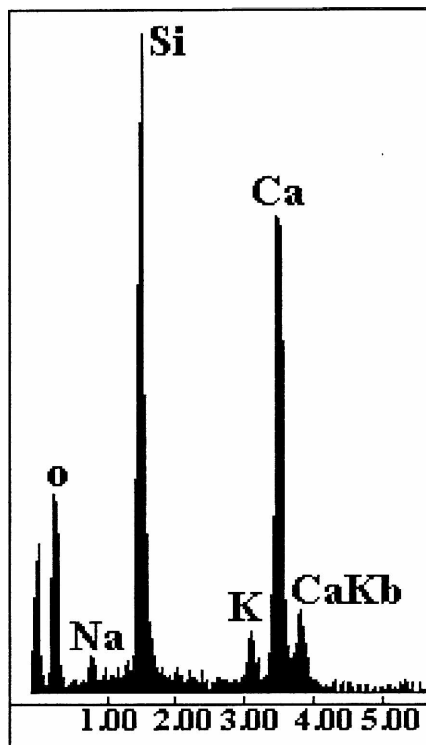


Figura 4. EDAX de ceolita

6. CONCLUSIONES

El análisis petrográfico de los materiales pétreos que se utilizarán, constituye un estudio imprescindible en la etapa de proyecto de una obra.

Un hormigón sano se caracteriza por un escaso desarrollo de microfisuras, buena compacidad de la pasta, contactos agregado-mortero netos y falta de productos de neoformación.

Los indicadores sobresalientes que se destacan en un hormigón que ha sido afectado por un proceso de degradación por reacción álcali-sílice son: 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 los poros, en la interfase pasta-agregado y ceolitización de la pasta.

Los principales materiales que integran los agregados potencialmente reactivos son el vidrio volcánico fresco o alterado principalmente a minerales arcillosos de grupo

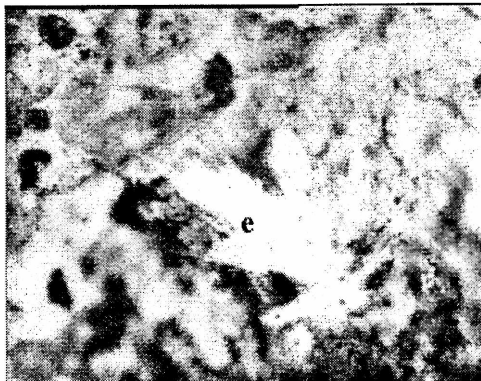
de la montmorillonita, calcedonia y/o variedades de sílice criptocrystalina y cuarzo tensionado (con extinción ondulante).

El análisis petrográfico de un hormigón endurecido, aporta claras evidencias acerca de su estado.

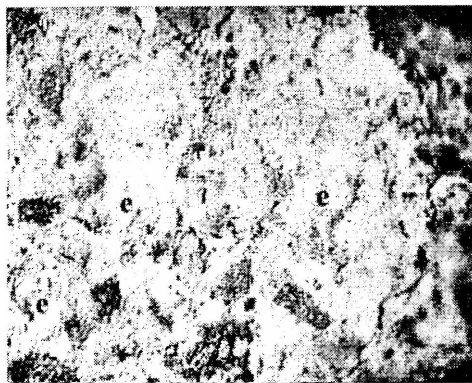
REFERENCIAS

- ASTM C-9 P214, 1990. Acelerated method. Book of standards, 04.02, 739.
- ASTM C-227, 1995 Mortar bar method. Book of standards, 04.02, 45.
- ASTM C-289, 1995. Chemical method. Book of standards, 04.02, 159.
- Cole, R. G. and P. Horswill, 1988. Alkali-silica reaction: Val de la Mare dam, Jersey, case history. Proc. Instn. Engrs. Part 1, vol. 84, 1237-1259.
- IRAM 1637, 1966. Reacción álcali-árido. Método de la barra de mortero para la determinación de la reactividad alcalina potencial.
- IRAM 1649, 1968. Reactividad alcalina potencial en áridos. Método de ensayo químico. 3-15.
- Léger, P.; P. Côté and R. Tinawi, 1996. Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams. Computers & Structures, vol. 60, N° 4, 601-611.
- Marfil, S. A. y P. J. Maiza, 1993. Zeolite crystallization in portland cement concrete due to alkali-aggregate reaction. Cement and Concrete Research, vol. 23 N° 6, 1283-1288.
- Marfil, S. A. and P. J. Maiza, 2001. Deteriorated pavements due to the alkali - silica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina. Cement and Concrete Research, vol. 31. N° 7, 1017-1021.
- Marfil, S. A.; P. J. Maiza y R. C. J. Salomón, 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° 16, 146-152.
- Prezzi, M.; P. J. Monteiro and G. Sposito, 1998. Alkali-silica reaction. Part 2: The effect of chemical admixtures. ACI Materials Journal, vol. 25, N° 1, 95-101.
- Qinhua, J. and L. Weiqing, 1997. Investigations on concrete railway ties suffering from alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research, vol. 27, N° 1, 107-113.
- Rodrigues, F.; P. Monteiro and G. Sposito, 1999. The alkali-silica reaction. The surface charge density of silica and its effect on expansive pressure. Cement and Concrete Research, vol. 29, 527-530.

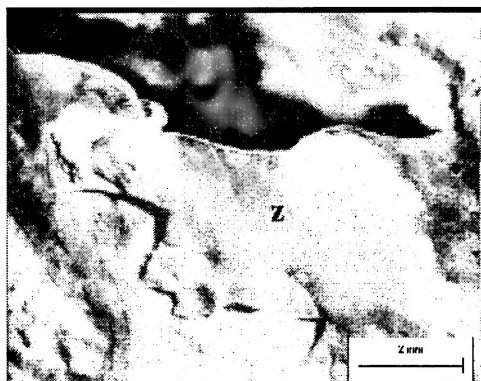
Petrografía del hormigón endurecido afectado por la reacción álcali-sílice...



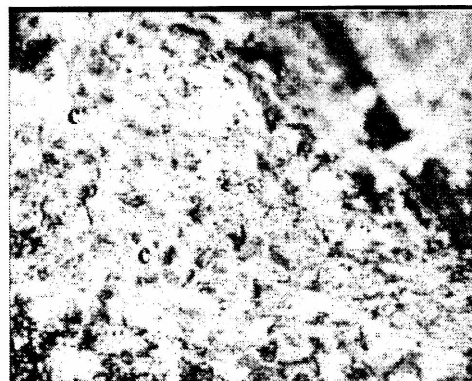
Fm1: Ettringita (e) desarrollada en el interior de una cavidad de aire



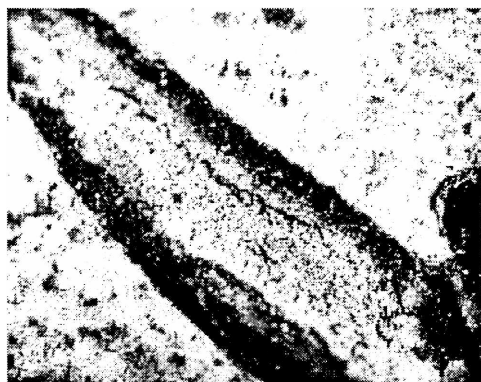
Fm2: Cristales de ettringita(e), sobre la superficie del hormigón



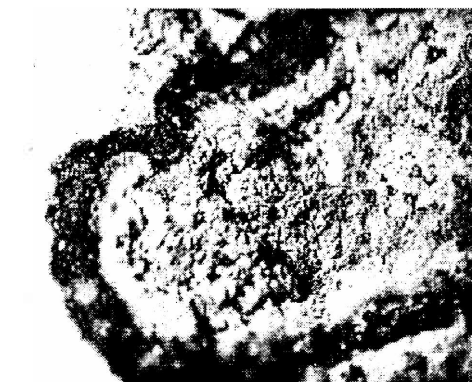
Fm3: Ceolita (z) desarrollada en un hormigón deteriorado por la reacción alcali-sílice



Fm4: Carbonato de calcio (c) tapizando la superficie del hormigón



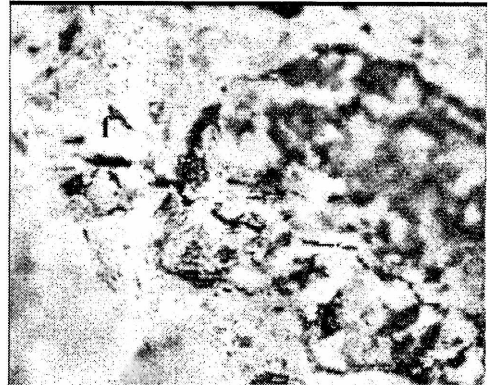
Fm5: Clastos de agregado grueso con su borde fuertemente afectado por el proceso de alteración



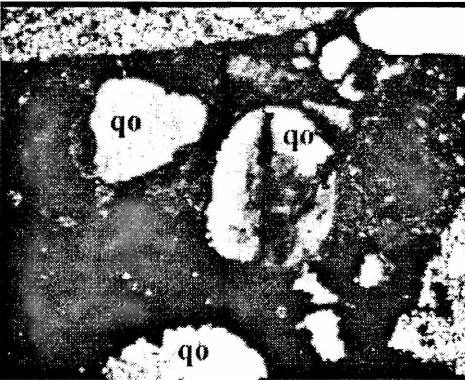
Fm6: Borde de reacción sobre un clasto de agregado grueso



Fm7. Hormigón deteriorado por la RAS . El proceso de reacción afecta a los clastos y al mortero



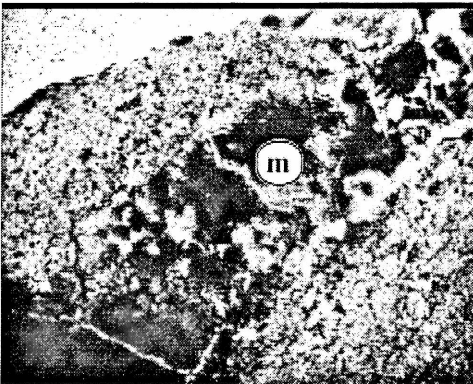
Fm8. Microfisura (f) que afecta al hormigón y a un clasto del agregado grueso



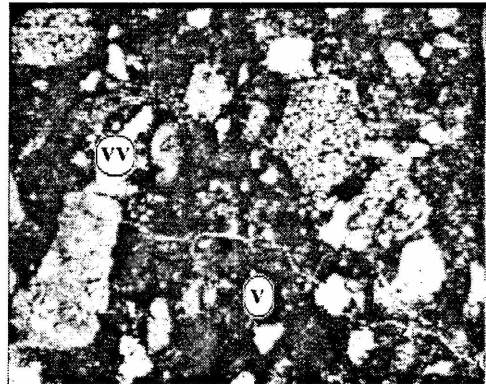
Fm9. Clastos de cuarzo con extinción ondulante (qo) nicoles cruzados



Fm10. Vulcanita vitrea (vv) con avanzado proceso de desvitrificación principalmente a montmorillonita

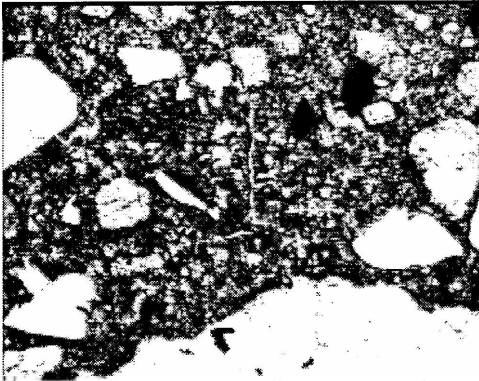


Fm11: Clasto de vulcanita vitrea en el que el vidrio se presenta alterado a montmorillonita (m)

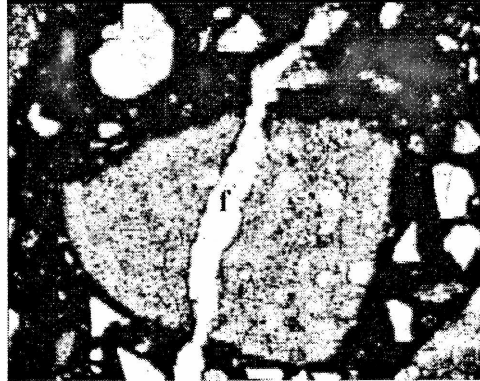


Fm12: Vidrio volcánico fresco(v) vulcanitas vítreas (vv)

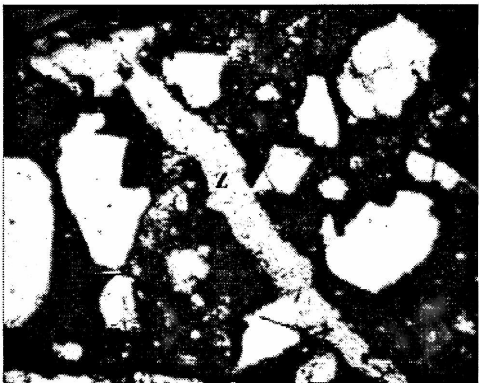
Petrografía del hormigón endurecido afectado por la reacción álcali-sílice...



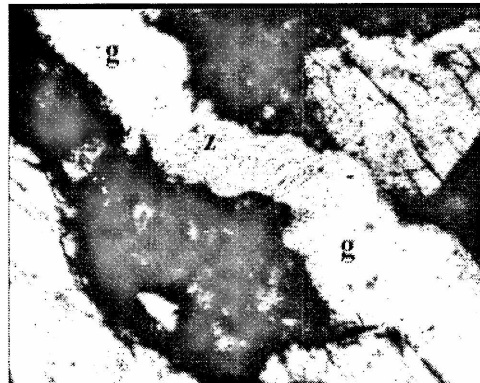
FM13: Hormigón sano con microfisuras propias del proceso de fraguado



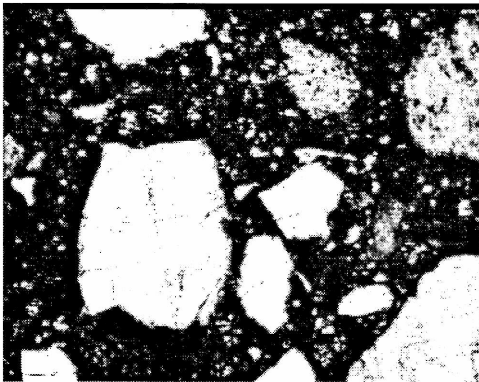
FM14: Fisura (f) en un hormigón deteriorado por la RAS que afecta a un clasto del agregado grueso



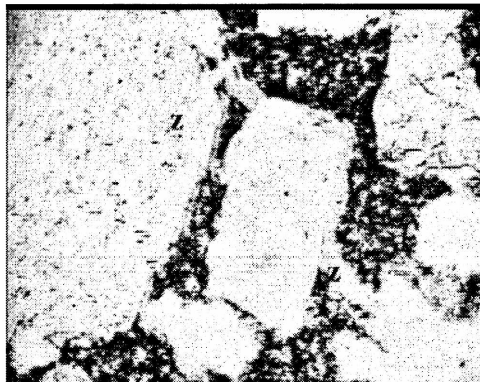
FM15: Fisura rellena con Ceolita (z)



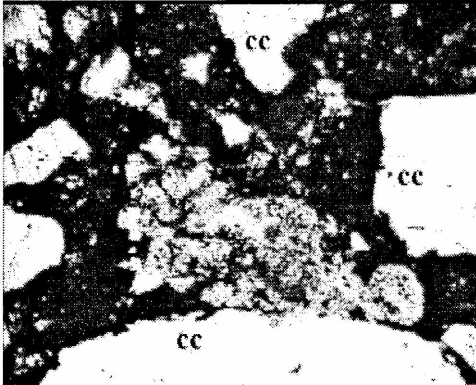
FM16: Microfisura desarrollada en un hormigón deteriorado rellena por gel (g) que ha cristalizado parcialmente a ceolita (z)



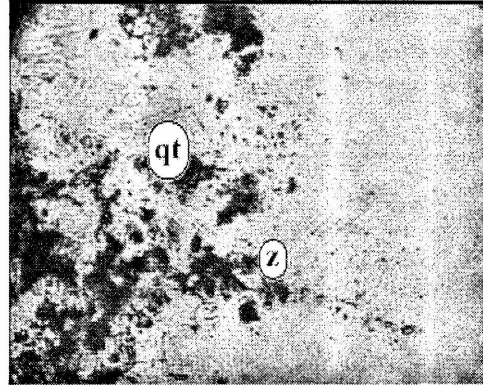
FM17: Hormigón sano. Los contactos agregado-pasta son netos



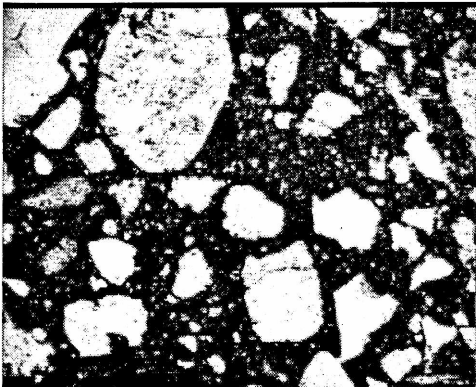
FM18: Hormigón deteriorado por la RAS. En los contactos agregado-pasta se ha desarrollado ceolita (z)



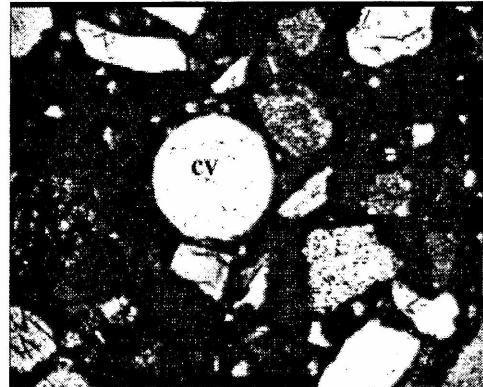
FM19. Contacto de caries (cc) entre elastos y pasta en un hormigón deteriorado



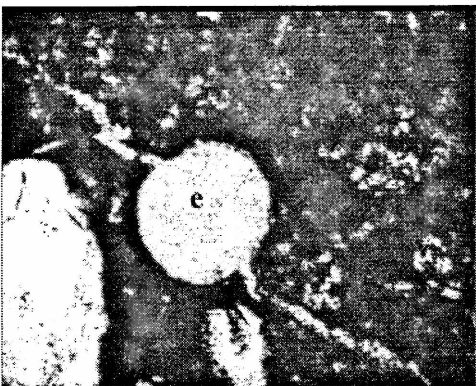
FM20. Ceolita (z) desarrollada en el borde de un elasto de cuarzo tensionado (qt)



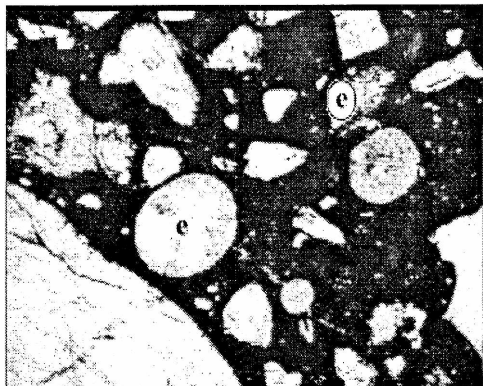
FM21. Vista general de un hormigón sano



Fm22. Cavity de aire accidental (cv) vacía en un hormigón sano

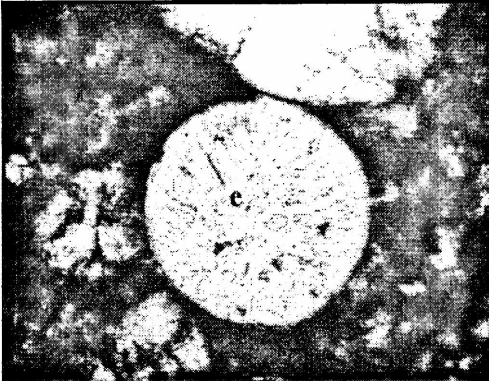


Fm23. Cavity de aire entrampado rellena con ettringita (e) con una microfisura asociada



Fm24. La cavity se encuentra parcialmente rellena con ettringita (e)

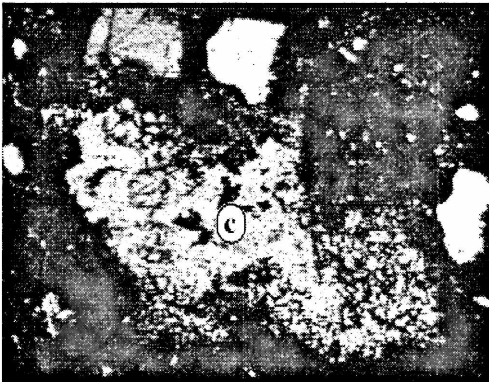
Petrografía del hormigón endurecido afectado por la reacción álcali-silice...



Fm25. Detalle de una cavidad de aire con ettringita (e)



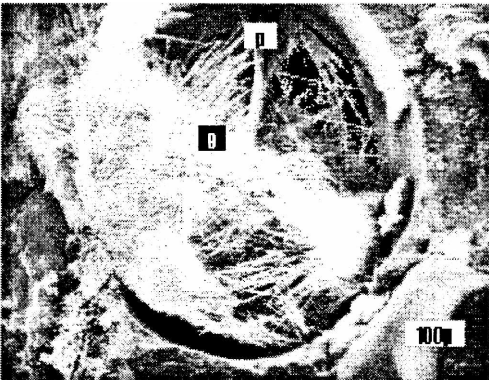
Fm26. Avanzado estado de coagulación (z) en la pasta. Se muestran elastos de cuarzo con extinción ondulante (qt) con contactos de caries



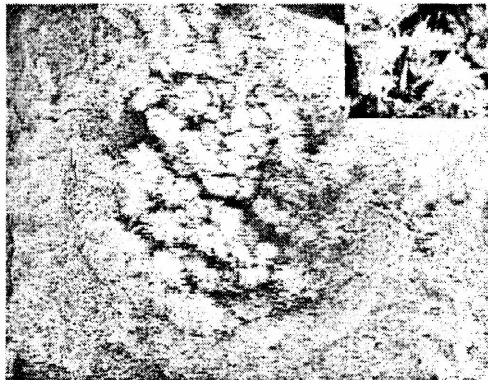
Fm27. Hormigón deteriorado con un fuerte proceso de carbonatación (c) en la superficie



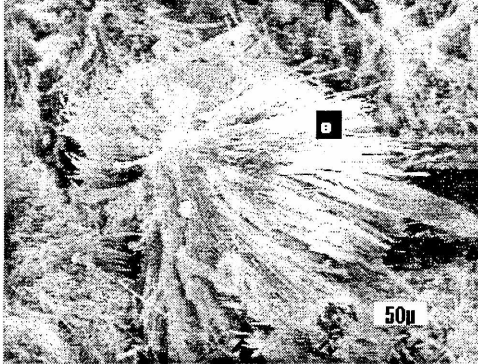
Fm28. Idem anterior con luz paralela



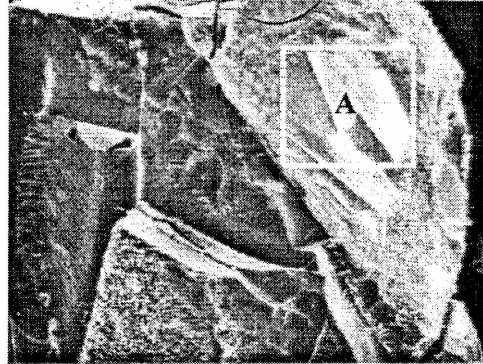
Fm29. Ettringita (e) y portlandita (p) desarrolladas en el interior de una cavidad de aire accidental



Fm30. Cristales de ettringita en forma de ramilletes



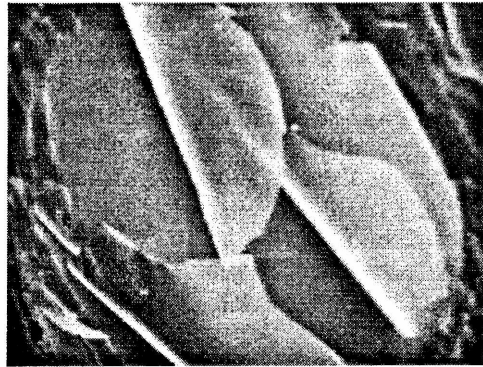
Fm31: Nido de cristales de ettringita (e) sobre la superficie de un hormigón deteriorado



Fm32: Ceolita obtenida de una zona de contacto agregado reactivo - pasta



Fm33: Ceolita masiva



Fm34: Cristales de ceolita.
Corresponden a un detalle de sector A de la Fm32