



## Evaluación de la acción del fuego en una estructura de hormigón armado mediante XRD, SEM y Espectroscopía infrarroja

S. B. Gea<sup>1</sup>, P. D. Chacón<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina.

### Información del artículo

#### DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v3i1.41>

Artículo recibido el 12 de Octubre de 2012 y revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 05 de Enero de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el tercer número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2013

### RESUMEN

El Monumento a los Héroes de la Independencia situado en Humahuaca (norte de Argentina) es una obra inaugurada en 1950 que representa magníficamente las razas autóctonas y europeas que conforman la identidad nacional. Las esculturas de bronce de 40t se encuentran sustentadas por una estructura de hormigón armado, la cual incluye instalaciones adecuadas para vivienda de un cuidador. El subsuelo de esta vivienda sufrió la acción de un incendio cuya carga y tiempo de duración se desconocen. A fin de evaluar los efectos en el hormigón producidos por el fuego, fueron tomadas muestras de un sector de la estructura que luego fueron analizadas por diversas técnicas: difracción por rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia infrarroja. El estudio permitió inferir la temperatura a la que estuvieron sometidas las muestras analizadas y la profundidad alcanzada por el daño. Se proponen los pasos a seguir para evaluar la totalidad de la estructura.

**Palabras Clave:** hormigón armado; fuego; microscopía electrónica; difracción por rayos X; espectroscopia infrarroja.

© 2013 ALCONPAT Internacional

### ABSTRACT

The Monument to the Independence Heroes in Humahuaca (northern Argentina) was built in 1950 and represents magnificently the native and European people which shape the national identity. A reinforced concrete structure bears the bronze sculptures of 40tons and includes a dwelling for the monument keeper. The basement of this dwelling underwent a fire whose load and duration are unknown. A few samples from a sector of the structure were taken in order to assess the effects that fire produced in the concrete. They were analyzed by different techniques: X-ray diffraction, scanning electron microscopy and infrared spectroscopy. The study allowed to infer the temperature experimented by the analyzed samples and the depth of the damage. The following steps to assess the whole structure are proposed.

**Keywords:** reinforced concrete; fire; electronic microscopy; X-ray diffraction; infrared spectroscopy.

Autor de contacto: Susana Gea ([geas@unsa.edu.ar](mailto:geas@unsa.edu.ar))

### Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 3, No. 1, Enero - Abril 2013, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat\\_int@gmail.com](mailto:alconpat_int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2013.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Quebrada de Humahuaca (provincia de Jujuy en el norte de Argentina), por su ubicación geográfica, fue una zona estratégica entre las conexiones de los virreinos del Perú y del Río de La Plata y puerta de entrada a este último por parte de las tropas españolas. La resistencia que opusieron los pueblos del norte argentino fue primordial para la consolidación de la independencia en 1816. Es por ello que en el seno de esta quebrada, por iniciativa presidencial, se eleva una obra monumental denominada “Monumento a los Héroes de la Independencia”, que fue inaugurada en 1950.

Dicho monumento está compuesto por tres cuerpos con altos relieves ubicados sobre un basamento de hormigón armado revestido en piedra (Figura 1). Sobre la colina de Santa Bárbara, se orienta hacia el este abriéndose a la calle a través de una imponente escalinata de 150m de longitud por 20m de ancho realizada con piedras de la región. La parte artística, trabajada en bronce, se inserta por el oeste en la propia colina de Santa Bárbara, sosteniendo la figura principal que encarna un hombre originario de estas tierras. Esta imponente figura del homenaje a los héroes de la independencia es visible desde los cuatros rumbos por sus grandes proporciones, simboliza la nueva raza de los argentinos y fue denominada “el grito de libertad”.

Por sus características artísticas, la obra se considera de valor patrimonial, y además el propio sitio del emplazamiento, la Quebrada de Humahuaca, fue declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO.

Debido a que el conjunto presenta varias manifestaciones patológicas, se efectuaron estudios preliminares tendientes a evaluarlas y proyectar su puesta en valor (Gea et al., 2010).



(a)



(b)

Figura 1. (a) Fachada principal con escalinata de acceso; se observa la escultura principal y los altos relieves a sus pies sobre el basamento de hormigón revestido en piedra; (b) Fachada sur

## 2. LA OBRA. ESTRUCTURA Y MATERIALES

El conjunto escultórico de 40t se apoya sobre una estructura de hormigón armado revestida en piedra ornamental, cuyo interior, en la parte más baja, aloja un tanque de reserva de agua potable (Figuras 1 y 2), hoy en desuso. Esta estructura se encuentra flanqueada por dos muros curvos independientes de mampostería de piedra.

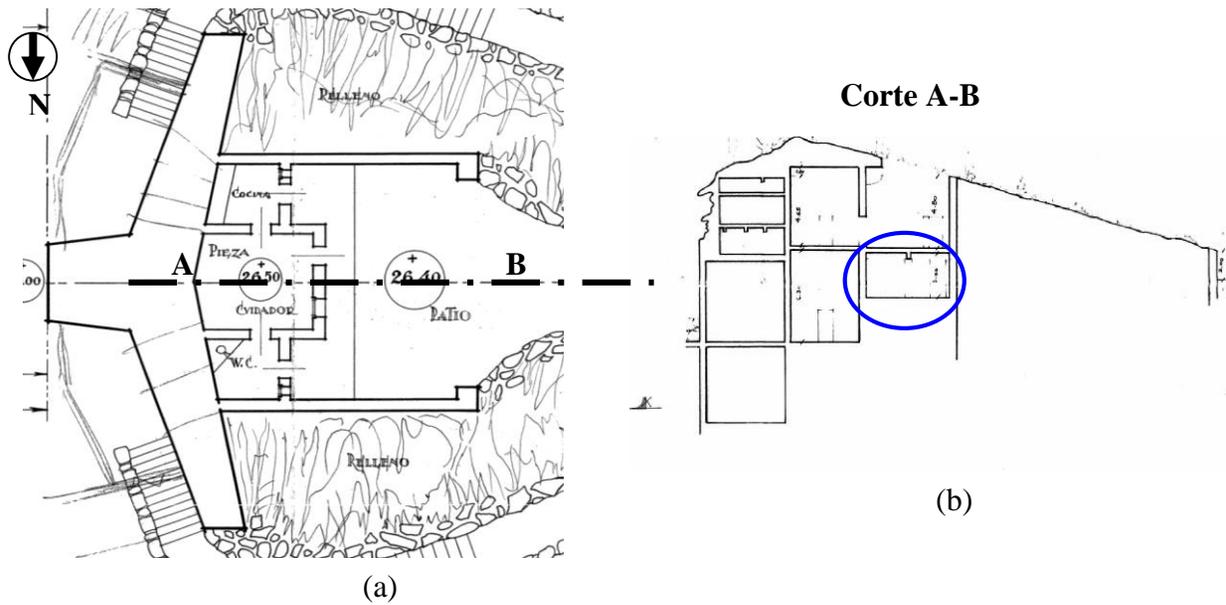
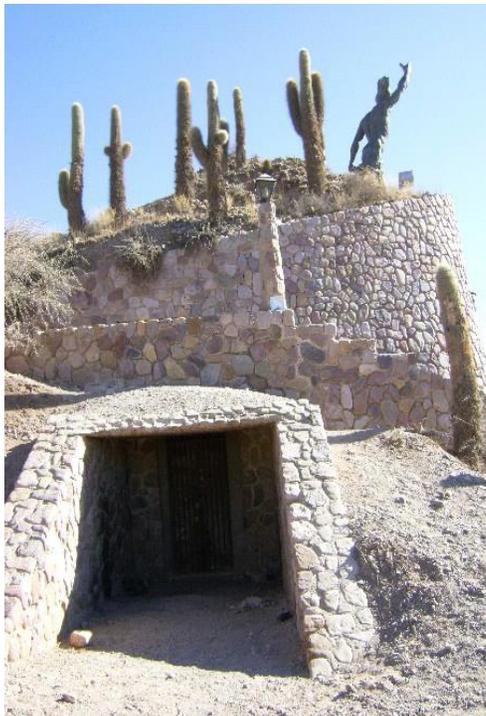


Figura 2. Planos originales de la obra de basamento. (a) Planta; (b) Corte A-B en donde se señala el recinto afectado por el siniestro.



(a)



(b)

Figura 3. (a) acceso a la vivienda por la fachada sur; (b) patio de la vivienda visto desde arriba sobre el relleno en donde se observa la ventilación del subsuelo.

El conjunto forma un recinto ocupado parcialmente por un edificio, cuya finalidad es la de constituir vivienda del cuidador del monumento, a la que se accede por la fachada sur y que en la actualidad se encuentra desocupado (Figuras 3.a y 3.b).

La estructura de este último es de hormigón armado, como también la del subsuelo bajo la casa. El espacio restante entre muros es ocupado por un relleno de tierra de la zona (Figuras 2 y 3.a).

### 3. PATOLOGÍAS OBSERVADAS EN EL HORMIGÓN SOMETIDO A FUEGO Y PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

Estando deshabitado el edificio, cuando años atrás el recinto era utilizado como archivo municipal, se produjo un incendio en el interior del subsuelo bajo la casa del cuidador (señalado en la Figura 2.b). La Figura 4 evidencia el estallido del recubrimiento por diferencias de dilatación térmica entre el hormigón y las barras de acero. Con el fin de evaluar la seguridad de la estructura de hormigón armado, se tomaron muestras del hormigón para realizar estudios de laboratorio que permitieran determinar los efectos del fuego en el material.

Tomando como fundamento el criterio de mínima intervención en obras de valor patrimonial, se decidió que, en una primera instancia, estas muestras involucraran solamente el recubrimiento de hormigón y en función de los resultados preliminares de la investigación, proceder o no a la extracción de testigos que comprendan todo el espesor de los elementos estructurales. En la Figura 4.b se muestra la zona de donde se extrajo la muestra.



Figura 4. (a) Efectos del incendio en el subsuelo y (b) detalle del estallido del hormigón en viga, indicando con la flecha el lugar de toma de muestra del material para análisis.

### 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El desconocimiento de las características del fuego que incidió sobre la estructura de hormigón armado del subsuelo (carga de fuego y tiempo de exposición) no permite inferir directamente sus consecuencias en el hormigón.

De acuerdo a los estudios realizados por Handoo et al. (2002), la reducción en el contenido de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandita) con el gradiente de temperatura desde la superficie expuesta hacia el interior del hormigón puede ser utilizada para determinar la temperatura a la cual este ha sido expuesto y

la consecuente profundidad del daño producido por fuego accidental. La presencia de la portlandita se detecta con facilidad por medio de difracción por rayos X (XRD, por sus siglas en inglés). Por otra parte, las investigaciones realizadas por el mismo autor con microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) en hormigón endurecido, muestran cambios en la morfología cristalina como consecuencia de la exposición a elevadas temperaturas, por lo que se utilizó esta técnica en una muestra del hormigón mencionado más arriba.

Investigaciones realizadas en hormigones envejecidos (más de 40 años de edad) muestran, por lo menos hasta una profundidad de 5cm, un alto grado de carbonatación de la matriz de cemento, como reacción con el CO<sub>2</sub>, tanto de la portlandita como de los hidratos del cemento. Esta reacción produce la descomposición del equilibrio original en el sistema del material, llevando a la formación y acumulación de calcita (Tam et al., 1972).

Como se trata de un hormigón de más de 60 años de edad, el contenido de portlandita se ha reducido por carbonatación natural del hormigón expuesto al ambiente. Por ello las muestras extraídas fueron estudiadas también por espectroscopía infrarroja, a fin de determinar los compuestos en la superficie exterior y también a una profundidad de 1cm, que es el espesor del recubrimiento de las barras de armadura.

#### **4.1 Difracción por rayos X (XRD)**

Para poder comparar contenidos de Ca(OH)<sub>2</sub> se tomó, además de la muestra superficial de la viga (ya que no se tiene muestra del núcleo de hormigón como se explicó anteriormente), una muestra adicional extraída del pie de una de las columnas del subsuelo, que presenta una superficie apenas tiznada y por lo tanto fue menos expuesta a la acción del fuego.

Ambas fueron estudiadas por XRD y los difractogramas se muestran en las Figuras 5 y 6, como también los compuestos que los acompañan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

En ninguna de las muestras se encuentra portlandita; es decir, tanto en el hormigón afectado por el fuego como en otro en que esta acción fue mínima, este compuesto ha desaparecido.

#### **4.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Algunas investigaciones (Handoo et al., 2002; Sydney, 1972) mostraron que especímenes de hormigón expuestos a temperatura moderada, es decir hasta 200°C, no evidencian ningún cambio distintivo en la morfología, mientras que a 300°C la morfología del hormigón muestra cristales de portlandita y de gel de CSH deformados, vacíos y la transformación de la portlandita en CaCO<sub>3</sub> (calcita). Mayores incrementos de la temperatura hasta 500°C llevan a la predominancia de microfisuras entremezcladas con los vacíos conjuntamente con portlandita y gel de CSH distorsionados. Este proceso se incrementa para temperaturas mayores a 500°C, en que se reduce rápidamente la resistencia del hormigón. Si la temperatura de exposición supera los 600°C hasta los 800°C, se producen cambios masivos en la morfología del hormigón afectado, debido al predominio de microfisuras, vacíos que incrementan la porosidad, cristales deformados de portlandita y límites desordenados de las interfases de CSH.

La micrografía de la Figura 7 corresponde al estudio de la cara expuesta al fuego del hormigón de una viga de la estructura (Figura 4.b), observándose cristales deformados y la presencia de vacíos y fisuras que evidencian la acción de elevadas temperaturas sobre la muestra. Como se esperaba, en ninguna de las micrografías tomadas se pudo identificar la presencia de Ca(OH)<sub>2</sub>.

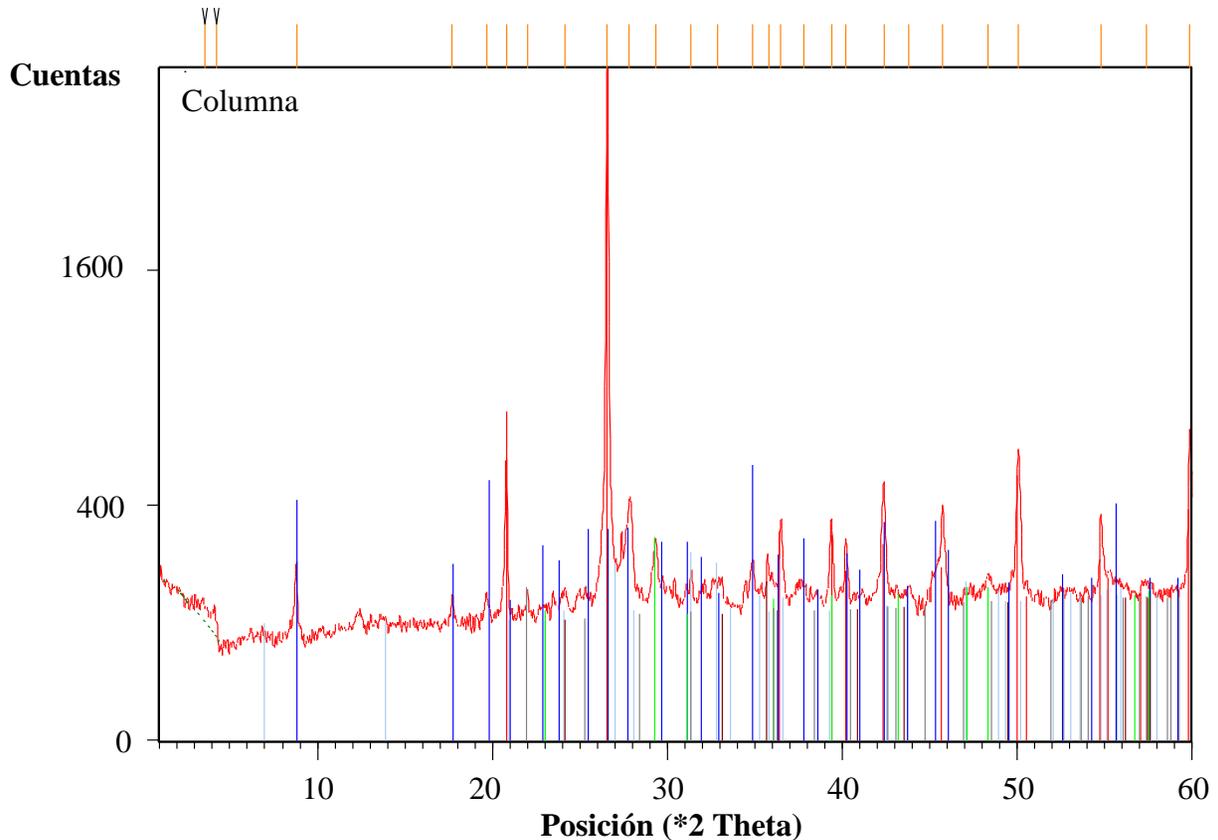


Figura 5. XRD de hormigón de pie de columna, no afectado por el fuego

Tabla 1. Compuestos obtenidos del estudio por XRD de hormigón de pie de columna

Visible	Resultado	Nombre del compuesto	Fórmula química
Rojo	60	Cuarzo $\alpha$ -alfa	Si O <sub>2</sub>
Azul	37	Muscovita	H <sub>4</sub> K <sub>2</sub> ( Al , Fe ) <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>24</sub>
Verde	33	Calcita	Ca ( C O <sub>3</sub> )
Gris	26	Cristobalita baja	Si O <sub>2</sub>
Marrón	19	Hematita, sin.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

### 4.3 Espectroscopía infrarroja (FT-IR)

La investigación con SEM y XRD que aporta la literatura sobre el proceso de deterioro del hormigón producido por altas temperaturas se realiza normalmente en muestras jóvenes, en las cuales la pérdida de portlandita constituye un buen indicador del proceso. Como se mencionó anteriormente, el hormigón en estudio es antiguo, por lo que resultó necesario complementar la información obtenida por esas dos técnicas. A tal fin, dos muestras fueron estudiadas con espectrofotómetro de infrarrojo Perkin Elmer modelo FT-IR Spectrum G-X: una constituida por material superficial de la viga (a la que llamamos “Exterior”) y la otra, por hormigón de la misma muestra, pero a 1cm de profundidad (denominada “Interior”).

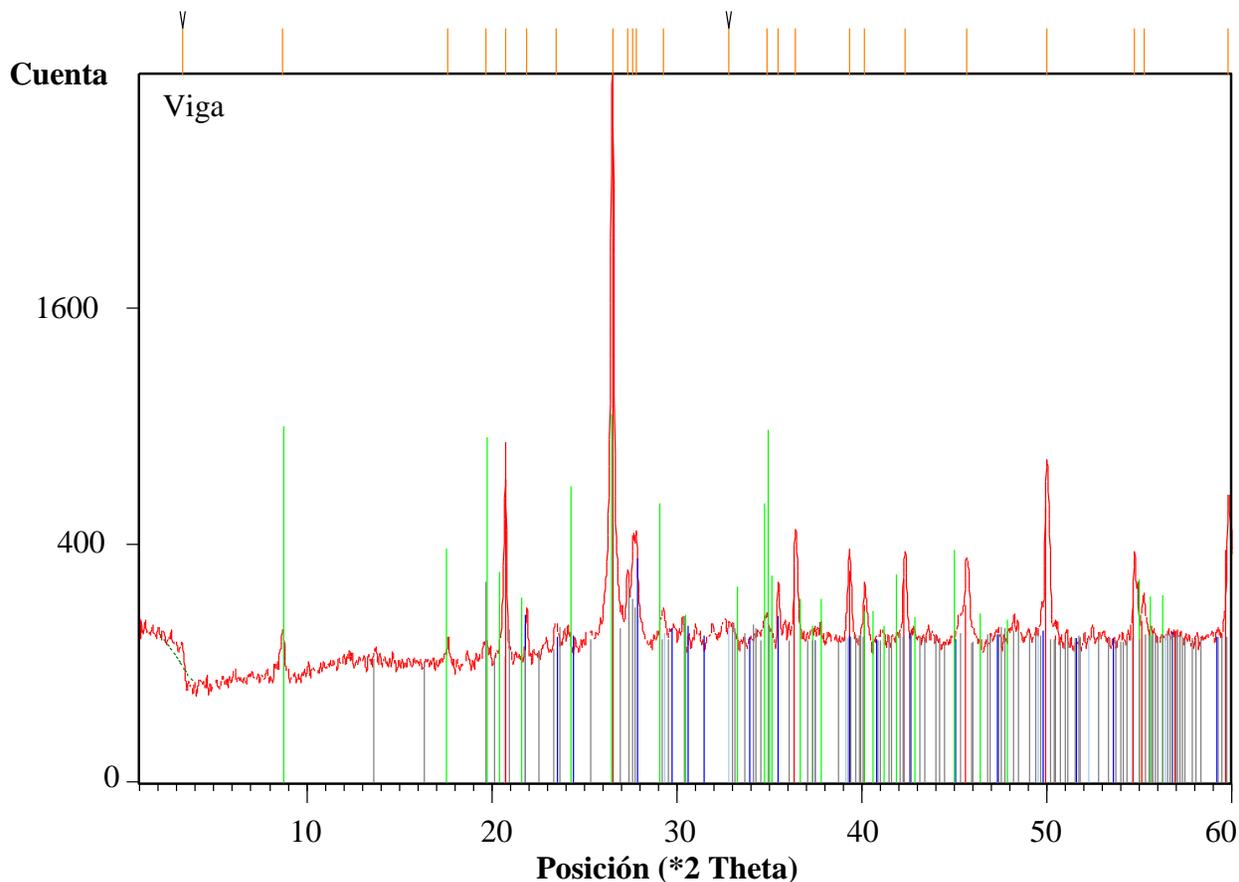


Figura 6. XRD de hormigón de viga, afectado por el fuego

Tabla 2. Compuestos obtenidos del estudio por XRD de hormigón de viga

Visible	Resultado	Nombre del compuesto	Fórmula química
Rojo	59	Quarzo $\alpha$ -alfa	Si O <sub>2</sub>
Azul	32	Labradorita	( Na <sub>0.4</sub> Ca <sub>0.6</sub> ) Al <sub>1.6</sub> Si <sub>2.4</sub> O <sub>8</sub>
Verde	13	Muscovita-1\ITM\RG, sin	K Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> Al O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>
Gris	24	Sulfato de sodio y magnesio hidratado	Na <sub>2</sub> Mg ( S O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ( H <sub>2</sub> O ) <sub>4</sub>

Se observa (Figura 8) una desaparición total de hidroxilos estructurales en la muestra Exterior, banda a 3624cm<sup>-1</sup>.

Esto indicaría un cambio estructural importante por calcinado o tostación (tratamiento a alta temperatura), ya que a pesar del tiempo transcurrido desde el incendio (algunos años) el hidroxilo no se ha recuperado por absorción de agua. Es decir, se ha producido un cambio estructural permanente.

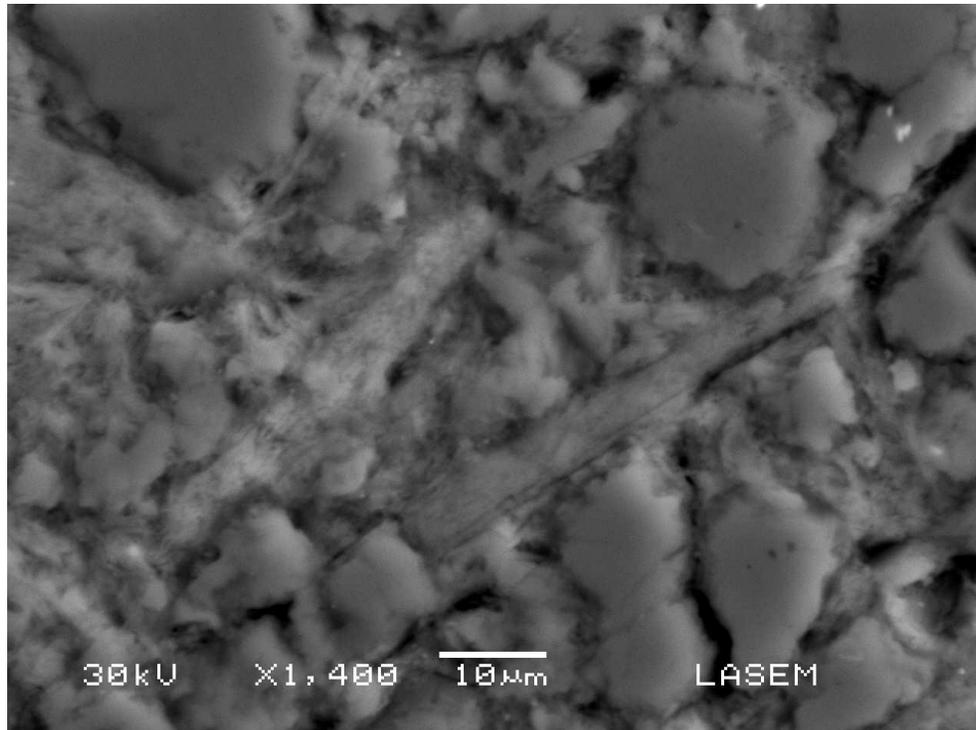


Figura 7. Micrografía SEM de hormigón superficial de viga afectada por el fuego

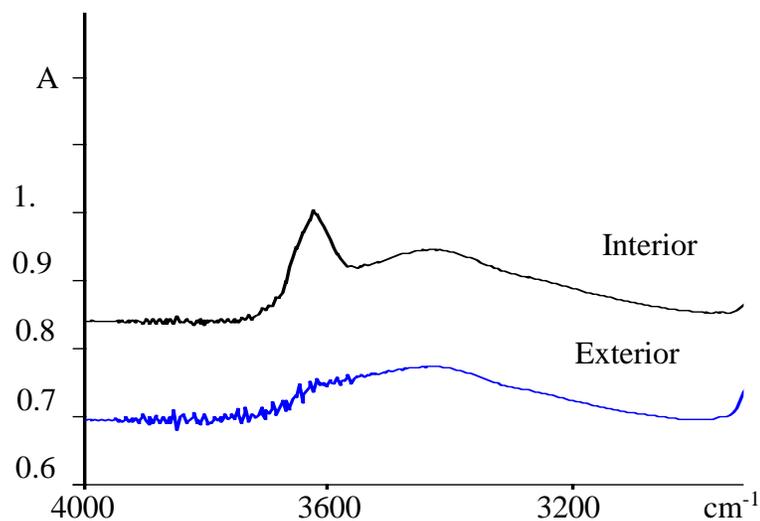


Figura 8. Comparación de la presencia de hidroxilos estructurales en espectros de absorción FT-IR de muestra superficial (Exterior) y a 1cm de profundidad (Interior)

Por otra parte, en la banda  $876\text{cm}^{-1}$  (Figura 9) aparece un incremento en el contenido de calcita en la muestra Exterior respecto de la Interior.

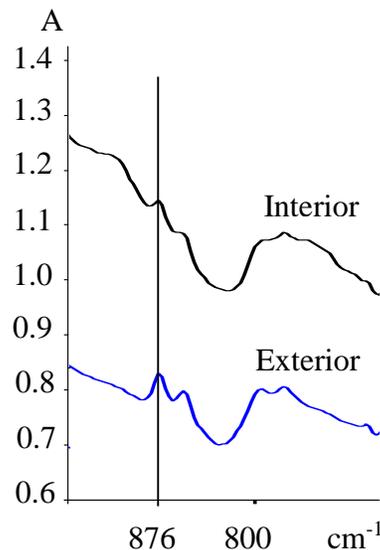


Figura 9. Comparación de la presencia de calcio en espectro de absorción FT-IR de muestra superficial (Exterior) y a 1cm de profundidad (Interior)

## 5. CONCLUSIONES

La estructura de hormigón armado del subsuelo del interior del Monumento a los Héroes de la Independencia, situado en la ciudad de Humahuaca, sufrió la acción de un incendio cuyas características de carga y duración se desconocen. Por tratarse de un edificio de valor histórico, se decidió tomar muestras pequeñas del hormigón, limitadas al recubrimiento de las barras de armadura, para realizar estudios preliminares sobre el grado de daño por temperatura. Dichos estudios consistieron en análisis por DRX, SEM y FT-IR.

De la observación de las deformaciones de cristales y presencia de vacíos y fisuras en la micrografía obtenida por SEM, se puede inferir que la acción del fuego elevó la temperatura de la superficie del hormigón de la viga, por lo menos hasta 500°C.

Por tratarse de hormigón envejecido, el estudio por DFR y SEM del contenido de portlandita no aportó información referente a la acción del fuego. La ausencia que se observó de este compuesto puede deberse, en general, al proceso de carbonatación natural del hormigón por acción del CO<sub>2</sub>. El estudio por FT-IR permite apreciar una reducción importante de los efectos del fuego a 1cm hacia el interior de la viga cuya muestra se analizó.

Si esta importante información puede confirmarse con el análisis SEM de nuevas muestras del material a 1cm de profundidad, será suficiente para afirmar que el fuego sólo afectó el recubrimiento de hormigón.

Los pasos a seguir, de acuerdo a la información proporcionada por los estudios preliminares son los siguientes:

- Tomar nuevas muestras de hormigón de recubrimiento en el resto de los elementos estructurales (vigas, columnas y losas) afectadas por el fuego.
- En el caso en que nuevas muestras de hormigón presenten resultados de FT-IR diferentes, será necesaria la extracción de testigos de hormigón que involucren todo el espesor de la viga en zonas de máximos esfuerzos.
- Estudios complementarios con ultrasonido aportarán información sobre la uniformidad del deterioro en la dirección longitudinal de todas las vigas y columnas del subsuelo.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración desinteresada del Ing. Silvano Locatelli en los análisis de FT-IR y del CeDIAP por facilitarnos los planos reproducidos en el presente trabajo.

## 7. REFERENCIAS

Gea S., Suárez O., Boso M., Chacón P. (2010), *Estudios preliminares para la puesta en valor del Monumento a los Héroes de la Independencia de Humahuaca (Jujuy, Argentina)*, en el VI Congreso Internacional Sobre Patología y Recuperación de Estructuras (Libro de resúmenes ISBN 978-987-25855-2-5)

Handoo S.K., Agarwal S., Agarwal S.K. (2002) *Physicochemical, mineralogical and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures*, Cement and Concrete Research, v. 32, pp. 1009-1018.

Sidney D., (1972) *Identification of hydrated cement constituents using a scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectrometer combination*, Cement and Concrete Research 2 (5) pp. 617-632.

Tam V. W. Y., Gao X.F., Tam C.M, (1972), *Carbonation around near aggregate regions of old hardened concrete cement paste*, Cement and Concrete Research v. 35, pp. 1180-1186.