



TÓPICO 1 – (Patologías de las construcciones)

Evaluación de elementos estructurales de hormigón expuestos a un incendio

Señas L.^{1,a}, Maiza P.^{2,b}, Priano C.^{1,c}, Marfil S.^{3,d}, Valea J.^{1,a}

¹Docente Dpto. de Ingeniería - UNS. Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina

² Prof. Dpto. de Geología – UNS. Inv. CONICET–INGEOSUR. San Juan 670. B. Bca. Argentina

³ Prof. Dpto. de Geología – UNS. Inv. CIC de la Prov. de Bs. As. – INGEOSUR. San Juan 670. Bahía Blanca, Argentina

^alsenas@uns.edu.ar, ^bpmaiza@uns.edu.ar, ^ccpriano@uns.edu.ar, ^dsmarfil@uns.edu.ar

Palabras-clave: hormigón, incendio, patología.

Resumen

Se analizó el daño generado por un incendio en una estructura de hormigón de un establecimiento industrial.

Se calaron testigos de los elementos que estuvieron sometidos a calor, y se hicieron determinaciones de resistencia a la compresión, densidad, absorción, porosidad y profundidad de carbonatación.

Los resultados de los ensayos se compararon con los valores correspondientes al hormigón que se vio menos comprometido por el siniestro. Se determinaron los porcentajes de variación de las propiedades físico-mecánicas analizadas para estudiar la capacidad portante residual de la estructura.

Los testigos fueron observados con estereomicroscopio y se realizaron cortes delgados que se estudiaron con microscopio de polarización. Se evaluó la interfase agregado-mortero y el efecto de la temperatura en los distintos componentes pétreos.

Se tomaron muestras del acero de las armaduras comprometidas en el incendio para evaluar el grado de afectación como consecuencia de la exposición a elevada temperatura y enfriamiento brusco.

Introducción

La exposición de una estructura de hormigón armado a las elevadas temperaturas que se desarrollan en un incendio, afecta su durabilidad y sus prestaciones mecánicas. El daño producido puede ser variable en función de los materiales almacenados en la estructura, ya que su naturaleza define su combustibilidad y su tendencia a extender el fuego. Otro factor determinante en la intensidad del fuego y la extensión de las llamas, es el efecto de las corrientes de aire generadas por ventanas o aberturas [1].



El hormigón sufre cambios físicos y químicos, en muchos casos irreversibles, dependiendo este deterioro de la temperatura alcanzada, del tiempo de exposición, del tipo de enfriamiento y de la composición del hormigón.

Se producen reacciones y transformaciones químicas en todos los componentes del hormigón. Hasta los 105 °C, la pasta se deshidrata, por lo que se contrae. A mayor temperatura los agregados se expanden y predomina su expansión sobre la contracción de la pasta [2]. A 180 °C comienza la deshidratación del silicato de calcio hidratado; a partir de los 500 °C, la mayoría de los agregados dejan de ser estables, y los cambios son irreversibles, con una importante densidad de microfisuras que debilitan la zona de interfase agregado-mortero [3], y afecta directamente la resistencia mecánica del hormigón.

Todas las transformaciones de los agregados se manifiestan por un cambio en su coloración, a medida que aumenta el tiempo de exposición. Por encima de 300 °C, el color gris tradicional del hormigón se torna a rosado, como consecuencia de la presencia de hierro en la composición mineralógica de los agregados [4]. Entre 600 °C y 900 °C el color vuelve a un segundo gris con partículas rojas que indican friabilidad con alta succión de agua. De 900 °C a 1200 °C el color cambia a ante amarillento indicando que el hormigón está sinterizado y es friable [1]. Como este cambio en la coloración es permanente e irreversible, la temperatura máxima alcanzada por el hormigón de una estructura a posteriori de un incendio, se puede estimar en función de la tonalidad remanente [5].

La adherencia acero-hormigón también se ve afectada como consecuencia de que los dos materiales tienen diferentes coeficientes de dilatación, por lo que se producen desprendimientos del hormigón de recubrimiento y quedan expuestas las armaduras de refuerzo. Cuando un acero es sometido a temperaturas superiores a la de austenización, y luego enfriado con mayor o menor severidad (situación comparable a la de un proceso de temple), puede sufrir, según su composición química y la severidad del proceso, cambios estructurales (tamaño de grano y fases presentes) que modifican su comportamiento mecánico. Se manifiesta un incremento de la dureza y resistencia, y una disminución del alargamiento y la estricción [6, 7].

Los daños producidos por la acción de un incendio pueden agravarse en función del tipo de enfriamiento realizado. En el apagado de un incendio se produce un enfriamiento acelerado del hormigón sobrecalentado, debido a que el agua de rociado se encuentra a una temperatura mucho menor. Este cambio brusco genera un shock térmico, con la aparición de microfisuras en el hormigón, que afectan a su estructura interna [8]. Por este motivo, resulta interesante realizar estudios petrográficos con el fin de observar y evaluar el deterioro sufrido en la estructura luego de un incendio.



Algunos autores correlacionan la naturaleza, extensión y hasta una cuantificación del cuadro de fisuración, con las máximas temperaturas alcanzadas en elementos estructurales atacados por el fuego [9]. De esta manera, el estudio microscópico no solo permitiría hacer una estimación de la máxima temperatura alcanzada, sino también, de la profundidad del daño sufrido por el material desde la superficie atacada, espesor que deberá ser removido en los posibles trabajos de reparación.

La obra analizada en el presente trabajo es una nave industrial de 2400 m² de superficie y 12,5 m de altura. Está constituida por bases, columnas y vigas de hormigón y una cubierta metálica. La estructura sufrió un incendio por un período aproximado de tres horas, el cual se desarrolló con mayor intensidad en la zona central del interior de la nave. Éste se vio intensificado debido a la corriente de aire que se generó cuando el personal destinado a controlar el incendio, abrió un gran hueco en una pared lateral.

El material contenido en este establecimiento industrial consistía en envases plásticos (PET polietilen tereftalato) y sus respectivos esqueletos (polietileno) para el transporte. El primero de estos plásticos se caracteriza por ser autoextinguible, es decir, se apaga cuando se retira la fuente de calor, su propagación a la llama es débil y su combustión lenta; mientras que el segundo es fácilmente combustible. Cuando la temperatura supera el punto de inflamabilidad de los gases producidos durante la descomposición, se tiene la formación de la llama, por ejemplo, la temperatura de autoignición del polietileno es 350°. Es común el desprendimiento de abundantes gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂).

Materiales y métodos

Luego del incendio se realizó un relevamiento visual del estado de la estructura y se observaron signos de deterioro como: ladrillos cerámicos de la mampostería partidos, cambios de coloración en la superficie de algunas columnas, fisuras coincidentes con la dirección de las armaduras, desprendimiento del hormigón de recubrimiento, barras de refuerzo a la vista y se hallaban colapsadas las cabreadas y chapas del techo. (Figura 1).

La planta de la nave es rectangular, con columnas de 30 x 80 cm ubicadas en los laterales, en las cuales se calaron testigos pasantes, cilíndricos de 6,50 cm de diámetro, a una altura de 1,60 m medido desde el piso. Algunos se fracturaron en el momento de la extracción, pero esta situación no impidió que se obtuvieran muestras para ensayar. En la zona central, donde el incendio se desarrolló con mayor intensidad, no se pudieron obtener muestras para ser acondicionadas y ensayadas debido al estado de fisuración del hormigón. En estos casos, se calaron testigos a una altura de 7,5 m (Figura 2).



Figura 1: Relevamiento de la estructura

Previamente al calado de testigos, se realizó un relevamiento de la posición de armaduras mediante un método no destructivo de detección magnética para evitar, en lo posible, el corte de las barras de refuerzo.



Figura 2: Testigos extraídos

Sobre los testigos calados se realizaron los siguientes ensayos físico-mecánicos: resistencia a la compresión, norma IRAM 1551 [10]; densidad, absorción y porosidad, según lo establecido en norma ASTM C642-97 [11];



profundidad de carbonatación y determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido, según norma IRAM 1871 [12].

Se tomaron muestras del acero de las armaduras comprometidas en el incendio para evaluar el posible grado de afectación como consecuencia de la exposición a elevada temperatura y enfriamiento brusco. Dicha evaluación se puede hacer siguiendo dos metodologías que más que alternativas, son complementarias:

- a) El análisis metalográfico, para determinar tamaño de grano y fases presentes
- b) Ensayos mecánicos, principalmente ensayo de tracción para conocer límite de fluencia, resistencia, alargamiento y estricción.

Si bien para determinar la influencia de la historia térmica y hasta qué grado, consecuencia de la misma, se han modificado las propiedades del material, deberían contrastarse resultados de probetas sometidas al proceso de calentamiento-enfriamiento con el de probetas que no lo han sufrido.

Considerando que el objetivo era evaluar el riesgo de compromiso estructural, consecuencia del incendio, se decidió realizar en primera instancia, ensayos de tracción de probetas tomadas de la zona afectada por el calor y en función de los resultados, decidir la acción a seguir.

Se realizó un estudio petrográfico del hormigón y de los agregados con el propósito de evaluar el grado de fisuración y carbonatación del mortero, el efecto de la temperatura sobre los agregados gruesos y finos y su interfase con la pasta cementicea.

Para el estudio petrográfico 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, procesador de imágenes Image Pro Plus versión 3.1 y programas computarizados para tratamiento de imágenes y cuantificaciones.

Resultados y discusión

Ensayos físico-mecánicos

Las columnas en los extremos de la nave no presentan cambios en la coloración, mientras que las ubicadas en el sector central, tienen un color que varía entre gris rosado a gris amarillento.

Al calar los testigos, se constataron diferencias en la elección de los materiales con que fueron moldeadas las columnas. El agregado grueso, está



constituido en algunos casos por canto rodado y en otros por piedra partida de tamaño máximo nominal 25 mm, los cuales presentan una buena distribución en el hormigón de los testigos.

En la Tabla 1 se detallan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, realizados sobre los testigos extraídos en cada uno de los laterales de la estructura, y acondicionados según norma.

Tabla 1: Resistencia a compresión

Nº de orden	Lateral 1		Lateral 2	
	Agregado	Resistencia compresión (MPa)	Agregado	Resistencia compresión (MPa)
1	C.R.	(**)	C.R.	30,5
2	C.R.	(**)	C.R.	24,3
3	C.R.	(**)	C.R.	27,2
4	C.R.	(**)	C.R.	26,5
5	C.R.	(**)	C.R.	21,0
6	C.R.	13,5	C.R.	18,7
7	C.R.	10,3	C.R.	19,1
8	C.R.	9,5	C.R.	(*)
9	C.R.	10,8	C.R.	16,9
10	C.R.	10,0	P. Pda.	14,6
11	C.R.	11,0	P. Pda.	(*)
12	C.R.	16,2	P. Pda.	12,1
13	C.R.	16,3	P. Pda.	17,0
14	P. Pda.	17,2	P. Pda.	19,6
15	P. Pda.	16,4	P. Pda.	21,4
16	P. Pda.	18,3	P. Pda.	23,4

(*) La muestra obtenida no pudo ser acondicionada para el ensayo.

(**) No se calaron testigos.

Del análisis de los resultados se puede decir, que hay una disminución de la resistencia desde los extremos de la estructura hacia el centro, de aproximadamente el 50%. Los menores valores corresponden a las columnas que se ubican en coincidencia con el sector donde el siniestro se desarrolló con mayor intensidad. En dicha zona, se observaron muestras de hormigón desprendidas, con la impronta de la armadura de refuerzo totalmente limpia (Figura 3a). Esta situación es una clara evidencia de la pérdida de adherencia acero-hormigón debido a los diferentes coeficientes de dilatación de los dos materiales.

Las profundidades de carbonatación medidas por teñido con solución de fenolftaleína, en cada testigo extraído y el color superficial que presentaba la correspondiente columna calada, se detallan en la Tabla 2. La carbonatación



es variable y en muchos de los casos supera el espesor del recubrimiento (Figura 3b). A semejanza de lo ocurrido con las resistencias, los cambios de coloración y la intensa carbonatación se dan en la zona central.

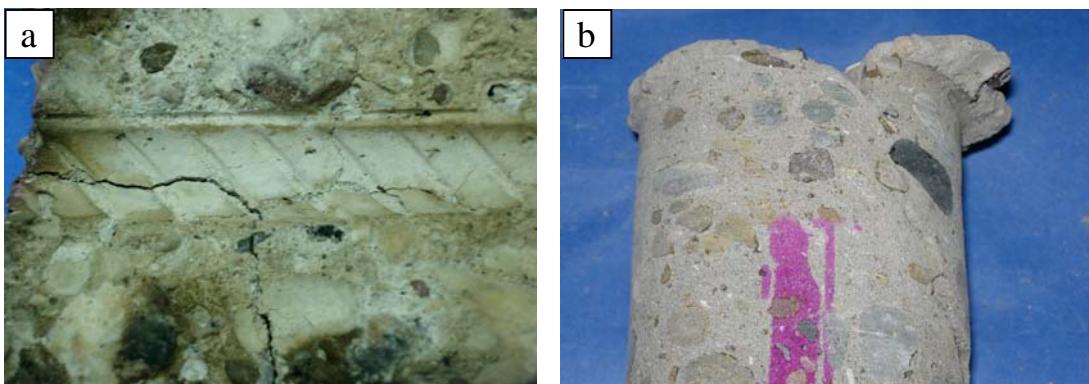


Figura 3. a: Impronta de armadura, b: Profundidad de carbonatación

Tabla 2: Profundidad de carbonatación y coloración superficial

Nº de orden	Lateral 1		Lateral 2	
	Profundidad Carbonatación (cm)	Alteración del Color	Profundidad Carbonatación (cm)	Alteración del Color
1	----	no	1,2	no
2	---	no	1,2	no
3	---	no	0,4	no
4	---	no	1,5	no
5	---	no	2,0	no
6	1,9	no	1,5	no
7	2,8	si	1,0	si
8	3,6	si	1,3	si
9	1,0	si	4,5	si
10	1,4	no	1,0	si
11	2,1	no	0,5	si
12	1,6	no	1,0	si
13	2,0	no	0,5	si
14	2,6	no	0,5	si
15	2,5	no	0,5	no
16	1,1	no	0,5	no

Los resultados de las determinaciones de densidad (saturado superficie seca), absorción y porosidad del hormigón de algunos de los testigos extraídos, se detallan en la Tabla 3.



Tabla 3: Densidad, Absorción y Porosidad

Muestra	Lateral	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)	Porosidad (%)
3	2	2,38	7,4	16,7
5	2	2,36	9,7	20,1
8	2	2,42	6,8	15,4
9	1	2,41	7,9	17,6
9	2	2,35	9,1	20,4
10	2	2,40	8,3	18,4
11	2	2,40	7,1	16,3
12	1	2,31	8,8	19,6
16	1	2,40	7,1	16,3

Para la determinación de la capacidad (C) y la velocidad de succión capilar (S) de agua del hormigón endurecido, se realizó un aserrado del testigo para obtener una muestra de 5 cm de espesor. El corte se hizo midiendo a partir de la superficie de exposición. Los resultados se detallan en la Tabla 4 y Figura 4.

Tabla 4: Velocidad y Capacidad de Succión Capilar

Muestra	Lateral	S (g/m ² s ^{1/2})	C (g/m ²)
1	2	17,1	2827
2	2	17,2	6410
4	2	17,8	8235
7	1	36,0	9541
13	1	19,1	7143
16	1	16,5	6007

La velocidad de succión capilar del hormigón, para cada una de las muestras, se calculó como la pendiente de la recta obtenida mediante ajuste por cuadrados mínimos de la serie de puntos correspondientes al intervalo de tiempo comprendido entre 0,1 C y 0,9 C.

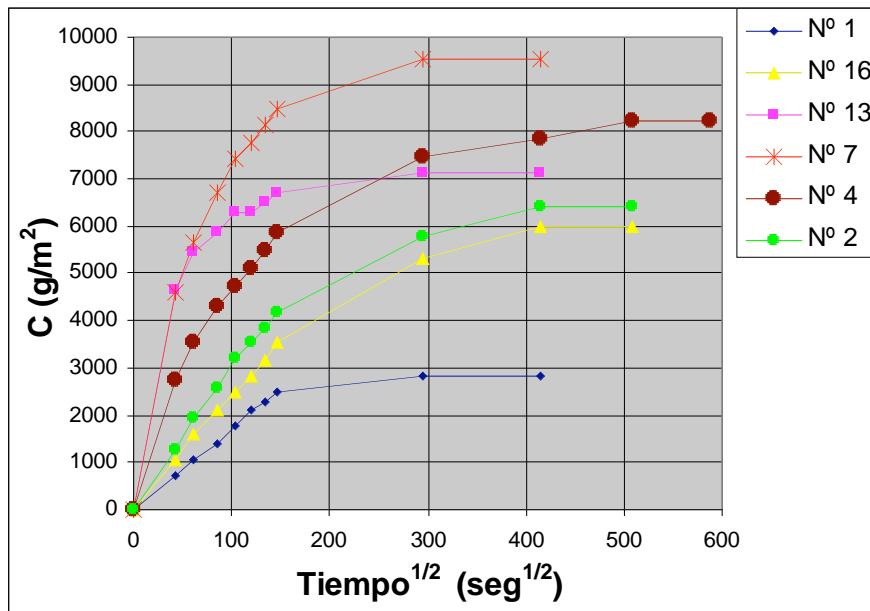


Figura 4: Capacidad de succión capilar

En todos los casos los valores indican una densidad uniforme, una elevada porosidad y alta succión capilar. Esta situación puede no estar vinculada totalmente con el incendio, sino que también influyen las características del hormigón original, del cual se carece de información.

Las probetas de acero ensayadas a tracción indican los siguientes resultados:

- En todas las muestras se obtuvieron valores de límite de fluencia y resistencia a tracción superiores a los mínimos requeridos por la norma IRAM-IAS U500-528 parte I [13].
- En las probetas de mayor diámetro (16 mm) se obtuvieron valores de alargamiento que superan el mínimo requerido por la norma (12%).
- En las probetas de menor diámetro (6 mm) los valores de alargamiento obtenidos (entre 8% y 10%) si bien no alcanzan el límite normado, no son críticamente bajos.

Como consecuencia puede afirmarse que el estado actual del acero de las armaduras, desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, no representa un compromiso para la estabilidad de la estructura en cuestión, motivo por el cual no se realizaron análisis químicos o metalográficos.

Petrografía del hormigón

El hormigón está constituido por una arena natural en cuya composición predominan las rocas volcánicas, cuarzo, feldespato, fragmentos de rocas graníticas, vidrio y minerales opacos.



El agregado grueso varía en los diferentes testigos analizados. En algunos casos es piedra partida granítica y en otro es canto rodado polimítico, constituido principalmente por vulcanitas. Los distintos tipos de rocas se comportan diferencialmente, pero todos se encuentran afectados en mayor o menor medida por el fuego. Las vulcanitas además de oxidadas están bordeadas por importantes fisuras. Algunas partículas de rocas graníticas están atravesadas por líneas de fractura.

El hormigón se encuentra fisurado, las partículas del agregado (grueso y fino) aparecen en algunos casos separadas del mortero, como se observa en la Figura 5a. Hay oxidación de las partículas de rocas volcánicas y carbonatación de la pasta. Son abundantes las microfisuras que se desarrollan en la periferia de las partículas de los agregados (Figura 5b). En la Figura 5c, se muestra un clasto de vulcanita cercano a la zona de fuego. El borde externo de la partícula, además de estar fisurado tiene mayor oxidación. Es frecuente que estas rocas presenten desferrización parcial con desprendimiento del mortero. Este fenómeno también se observa en los granos del agregado fino. La textura del mortero se encuentra totalmente obliterada, el microfisuramiento es intenso. (Figuras 5d y 5e). Algunas fracturas atraviesan las partículas del agregado (Figura 5f).

Conclusiones

- El incendio generado en el interior de la nave industrial afectó la resistencia mecánica de las columnas de hormigón, observándose una pérdida del orden del 50% en las ubicadas en el centro, respecto a las más alejadas del foco de fuego.
- Los elevados valores de porosidad y succión capilar de todas las muestras de hormigón, indican que en la actualidad, el hormigón posee baja calidad para las prestaciones que debe desempeñar.
- Mediante microscopía óptica se evidenció la alteración de algunos agregados, el desarrollo de microfisuras y el debilitamiento de la zona de interfase, evidencias de un proceso deletéreo debido a las elevadas temperaturas a las que fue expuesto el hormigón.
- Se sugiere la revisión del cálculo estructural de las columnas, debido a las propiedades evidenciadas por el hormigón.
- Desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, el estado actual del acero de las armaduras, no representa un compromiso para la estabilidad de la estructura.

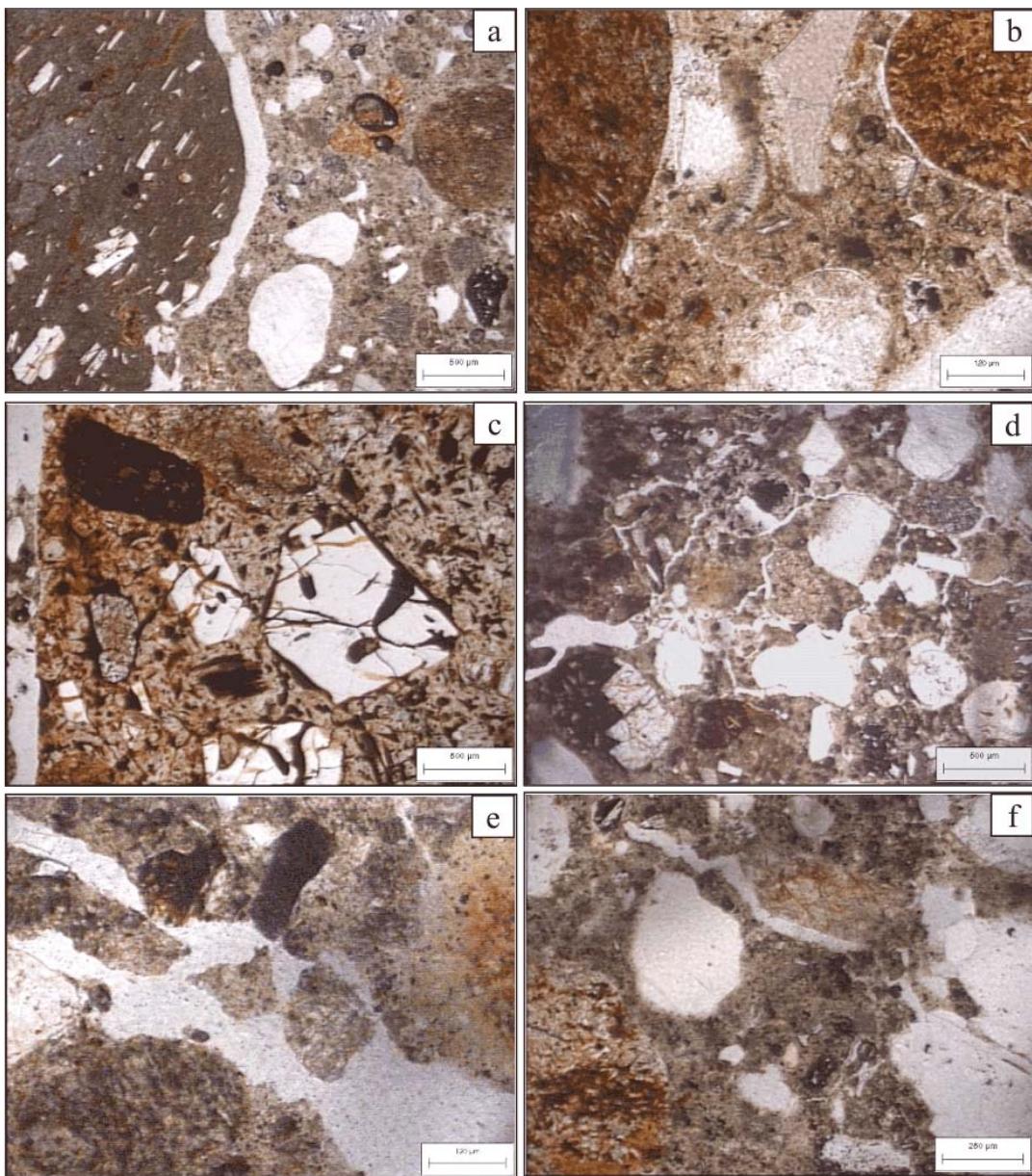


Figura 5. **a:** partículas de agregado grueso separadas del mortero. **b:** textura del mortero obliterada. **c:** clasto de roca volcánica oxidado y fisurado. **d:** microfisuras en el mortero. **e:** fracturas que afectan a la pasta y a una partícula de roca granítica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería, Departamento de Geología y a la SECyT de la Universidad Nacional del Sur, a la CIC y al CONICET por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones y al Sr. Rodolfo Salomón por la colaboración en la compaginación de las fotografías.



Referencias

- [1] M. Fernández Cánovas: *Patología y terapéutica del hormigón armado*. Ed. Dossat, Madrid (1977), pág. 392.
- [2] G. Giaccio, J. Tobes, M. Torrijos, R. Zerbino: *Comportamiento Mecánico de Hormigones Dañados por Temperatura*. VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción CONPAT (2005), Cap. II, pp. 17-24.
- [3] Z. Bazant, M. Kaplan: *Concrete at high temperatures. Material properties and mathematical models*. Concrete design and construction series, Longmann, (1996), pág. 412.
- [4] S. Guise: *Petrographic and color analysis for assessment of fire damaged concrete*. 19th International Conference on Cement Microscopy, (1999), pp. 365–372.
- [5] M. Klaric: *Fisuración y ataques físicos al hormigón, Durabilidad del hormigón estructural*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2001), pp. 47-95.
- [6] ASM Handbook: *Mechanical Testing and Evaluation*. Ed. ASM Internacional, Vol 08 (2000). Pág. 2235.
- [7] ASM Handbook: *Metallography and Microstructures*. Ed. ASM Internacional, Vol 09 (2004). Pág. 2733.
- [8] N. Ortega, L. Señas, C. Priano, P. Maiza, S. Marfil: *Alteraciones de las propiedades de hormigones expuestos a elevada temperatura y enfriamiento brusco*. X Congreso Latinoamericano de Patología y XII Congreso de Calidad en la Construcción. CONPAT (2009). Valparaíso-Chile. Pág. 15.
- [9] B. Georgali, P. Tsakiridis: *Microstructure of fire-damage concrete. A case study*. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, 2. (2005), pp. 255-259.
- [10] IRAM 1551: *Hormigón de cemento portland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2000) pág. 12.
- [11] ASTM C642-97: *Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete*. American Society for Testing and Materials. (1997) pág. 3.
- [12] IRAM 1871: *Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004) pág. 12.
- [13] IRAM-IAS U500-528 parte I: *Barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructuras de hormigón*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1998) pág. 20.