

## HORMIGONES ELABORADOS CON DISTINTOS TIPOS DE AGREGADO EXPUESTOS A ALTAS TEMPERATURAS

BARRAGÁN, B. \*, DI MAIO, A. \*\*, GIACCIO, G. \*\*\*, TRAVERSA, L. \*\*\* y ZERBINO, R. \*\*\*\*

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en experiencias realizadas sobre hormigones elaborados con matrices de similares características y diferente tipo de agregado grueso, expuestos a altas temperaturas (500 y 700 °C) y enfriados bajo distintas condiciones (lento: al aire y rápido: mediante chorros de agua). Estos hormigones fueron evaluados antes y después del tratamiento mediante diversos ensayos no destructivos. Posteriormente se realizó un análisis exhaustivo del comportamiento mecánico bajo sollicitaciones de compresión y tracción de las muestras sometidas a temperatura el que es comparado con el de otras muestras que no fueron expuestas a ningún tipo de tratamiento.

### INTRODUCCIÓN

Las propiedades del hormigón se ven sustancialmente modificadas por la exposición a altas temperaturas, debido a la aparición de micro y microfisuras que afectan su estructura. El grado de alteración que se produce depende fundamentalmente del nivel de temperatura alcanzado, del tiempo de exposición y de la composición del hormigón.

La permanencia del hormigón a altas temperaturas hace que se produzcan cambios físicos y químicos en el material que dependen tanto de la composición de la matriz como del tipo de agregado empleado. Los agregados ocupan el mayor volumen dentro de la masa del hormigón y conforme sus características mineralógicas, coeficientes de dilatación, etc. los daños que se producen son diferentes.

\* Becario CIC, LEMIT.

\*\* Investigador CONICET, LEMIT. Profesor Fac. de Ing. UTN Reg. La Plata.

\*\*\* Investigador CIC, LEMIT-UNLP. Profesor Fac. de Ing. UNLP.

\*\*\*\* Investigador CONICET, LEMIT-UNLP. Profesor Fac. de Ing. UNLP.

La mayoría de los agregados es estable por debajo de 500 °C, en el caso de los agregados no silíceos no sufren transformaciones ni reacciones de descomposición a temperaturas inferiores a los 600 °C. Es conocido que la transformación alotrópica del cuarzo  $\alpha$  (trigonal) a cuarzo  $\beta$  (hexagonal) ocurre progresivamente entre 500 y 600 °C y es acompañada por una significativa expansión del orden de 1.2 %. Por otra parte, la decarbonatación de los agregados calcáreos se produce entre los 600 y 900 °C. Los basaltos, en general, no muestran cambios de fase por debajo de los 800 °C. (1)

Con respecto a las modificaciones que se producen a nivel de la pasta a medida que es expuesta a temperaturas crecientes se pueden indicar como puntos salientes la expulsión del agua evaporable (100 °C), el comienzo de la deshidratación del silicato de calcio hidratado (180 °C), la descomposición del hidróxido de calcio (500 °C) y la del silicato de calcio hidratado (que comienza alrededor de 700 °C). (1)

Las afectaciones producidas por las altas temperaturas son mucho más notorias cuando el hormigón supera los 500 °C, considerándose que para este nivel, los daños que se producen son prácticamente irreversibles (1,2). Para temperaturas de entre 500 y 700 °C se han medido pérdidas de peso del orden del 4 % para hormigones elaborados con cuarcita y basalto, y de casi el 10 % para los elaborados con calizas. Para igual rango de temperaturas se midieron coeficientes de expansión térmica de 12.5, 25.0, 33.0 y  $47.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  para diferentes tipos de rocas (anortosita, arenisca, caliza y granito). Asimismo se midieron valores de expansión lineal (a 600 °C) de hormigones elaborados con distintos agregados iguales a 0.5, 0.7, 0.8, 1.1 y 1.5 % (escoria expandida, caliza, basalto, arenisca y cuarcita) (1).

La deshidratación y cambios de porosidad de la pasta de cemento, las deformaciones diferenciales o procesos de transformación de los agregados que genera la exposición a altas temperaturas afecta como era de esperar la resistencia y la deformabilidad del hormigón. Los principales efectos se traducen en el debilitamiento a nivel de interfaces, reducción en la resistencia de la matriz por incremento de la porosidad o destrucción de los productos de hidratación, alteraciones de los agregados y desarrollo de microfisuración.

En lo que se refiere a las propiedades mecánicas se encuentra una amplia variabilidad en los resultados y aparecen a veces algunas contradicciones; esto puede deberse en cierta medida a la misma definición de "resistencia" por lo que es necesario profundizar aspectos vinculados al proceso de fractura dentro del material.

La mayor parte de la bibliografía incluye principalmente datos de la variación de la resistencia (sea a compresión, tracción o flexión) a medida que se produce la elevación de la temperatura. En términos generales se puede sintetizar que se producen cambios en la resistencia menores al 25 % para temperaturas de hasta 200 °C (primero un descenso cerca de los 100 °C y luego un nuevo incremento), luego se produce un decrecimiento progresivo que es más intenso por encima de los 300 °C. (1). A temperaturas máximas de 700 a 800 °C se verifica una drástica caída en la resistencia residual, midiendo valores del orden del 30 % en promedio; es interesante destacar que la variabilidad de los mismos para iguales condiciones de ensayo es muy notable

conforme el tipo de agregado empleado, entre ellos las calizas o agregados dolomíticos puros aparecen entre los agregados naturales más eficientes para sobrellevar altas temperaturas y los agregados silíceos los menos.

Por otro lado también se ha verificado que la presencia de microfisuración en la estructura del material conduce a un decrecimiento en el módulo de elasticidad en pastas de cemento, en morteros y en hormigones; existe bastante discrepancia en lo que se refiere al nivel de afectación hecho que también puede deberse a diferentes criterios aplicados para la definición del módulo de Young y al efecto que pueden tener los cambios en los contenidos de humedad. En algunos trabajos también fue observado que la relación de Poisson decrece rápidamente con el incremento de la temperatura.

Además del nivel de temperatura máximo alcanzado el grado de alteración depende notablemente del tiempo de exposición y del tipo de enfriamiento que experimentan los distintos elementos estructurales (3). La bibliografía coincide en que la mayor afectación se produce durante las primeras 2 horas de exposición. También se encuentra que en general la resistencia de ensayos realizados a elevada temperatura es mayor que si se permite el enfriamiento de las muestras previo a la carga y que la diferencia es aún mayor cuando el descenso de temperatura es brusco, hechos que pueden justificarse considerando el proceso de microfisuración que sufre el material por la aparición de tensiones de tracción. Por causas similares la resistencia residual frente a las altas temperaturas que alcanzan probetas precomprimidas (a bajos porcentajes de la resistencia) es mayor que la de aquellas que son calentadas sin tensionar. (1).

Este trabajo forma parte de un proyecto destinado a evaluar el comportamiento de hormigones convencionales y especiales cuando son expuestos a altas temperaturas. Previamente fue analizado en forma detallada el efecto del nivel de temperatura y el tipo de enfriamiento sobre las propiedades de un hormigón convencional (4). Recientemente se extendió tal análisis a hormigones elaborados con matrices de distintas características e igual tipo de agregado, estudiando la influencia del nivel de resistencia (relación  $a/c$ ) como así también la utilización de adiciones minerales (5). En este artículo se presentan experiencias de laboratorio en las que se evalúan hormigones que poseen una matriz semejante, pero distinto tipo de agregado. Se seleccionaron dos agregados gruesos entre los más utilizados en nuestra región, piedra partida granítica y canto rodado silíceo, que presentan no sólo diferencias desde el punto de vista mineralógico sino también en su forma y textura superficial, hecho que conduce a cambios en los mecanismos de adherencia (6,7). (Se puede asumir, por lo expuesto anteriormente, que los agregados que poseen un alto porcentaje de cuarzo se encuentran entre los más afectados frente a las altas temperaturas). Los hormigones fueron expuestos a temperaturas de 500 y 700 °C durante una hora, y posteriormente sometidos a enfriamientos diferenciados (con agua y al aire). Se determinó el tiempo de pasaje de pulsos ultrasónicos, el módulo de elasticidad dinámico, resistencia y deformabilidad bajo sollicitaciones de tracción y compresión. También se determinaron niveles característicos de fisuración y se realizaron ensayos estables sobre probetas entalladas en orden a observar el comportamiento postpico y obtener una medida de la energía de fractura. En todos los casos las propiedades de las muestras sometidas a temperatura fueron comparadas con otras que no sufrieron ningún tipo de tratamiento.

## EXPERIENCIAS

En las experiencias realizadas se evaluaron hormigones de razón agua/cemento 0.50 elaborados con cemento portland normal, arena silíceo natural y dos tipos de agregado grueso, piedra partida granítica (PPG) y canto rodado silíceo (CRS) de tamaño máximo 19 mm. En todos los hormigones se mantuvo constante el volumen de agregado grueso, dado que es la variable a analizar en este trabajo, y se modificó el contenido de pasta de modo de lograr mezclas plásticas con asentamientos similares (80 y 70 mm respectivamente).

Con cada hormigón se moldearon probetas cilíndricas (150 x 300 mm), de las cuales un grupo fue expuesto a 500 °C de temperatura máxima y otro a 700 °C. Otro grupo de probetas no fue sometido a ningún tratamiento, quedando como muestras de referencia. Para el tratamiento térmico se empleó un horno eléctrico con control automático de temperatura, revestido con material refractario y aislante y con una ventilación en su parte superior para permitir la eliminación de los gases. La temperatura máxima del horno fue mantenida durante una hora. La velocidad de elevación de temperatura dentro del hormigón medida mediante termocuplas insertas fue del orden de 100 °C/hora. (A modo de ejemplo cabe citar que los registros indicaron que, para el caso de temperatura máxima 500 °C, al cabo de una hora en el interior de la probeta se alcanza una temperatura de 480 °C, ver Fig. 1). Dentro de cada grupo algunas muestras fueron enfriadas lentamente en el horno mientras que otras fueron retiradas inmediatamente después de cumplido el tiempo de exposición y enfriadas con chorros de agua durante media hora. Sobre las probetas se realizaron ensayos no destructivos y ensayos de compresión. Además de los cilindros, se prepararon probetas prismáticas (75 x 105 x 430 mm) para la determinación de la energía de fractura y de las resistencias a flexión y a tracción por compresión diametral. Sobre los prismas también se realizaron evaluaciones mediante métodos no destructivos.

Previo a los ensayos, las probetas fueron curadas durante los primeros 28 días en cámara húmeda (HR: 95%; T: 20 ± 2 °C), permaneciendo posteriormente otros 28 días en ambiente de laboratorio. Luego del tratamiento térmico, las probetas quedaron durante tres días en esta última condición. Con el propósito de evaluar el efecto que producen las altas temperaturas sobre los distintos hormigones, se realizó, antes y después del tratamiento, una inspección visual de las probetas, la determinación del módulo de elasticidad dinámico, y medidas del tiempo de pasaje de ondas ultrasónicas. Posteriormente fueron ensayadas a compresión o tracción según el caso.

Como ya fuera planteado este trabajo forma parte de un programa de investigación más amplio. Algunos resultados ya fueron publicados con anterioridad siendo posible encontrar una descripción más detallada de la metodología de trabajo empleada en la revista Ciencia y Tecnología del Hormigón N° 5. (4).

Continuando con la notación empleada anteriormente los hormigones se identifican según la máxima temperatura alcanzada (500, 700) seguida por el tipo de enfriamiento adoptado (a: aire, w: agua). El hormigón de referencia que no fue expuesto a alta temperatura se identifica como Control.

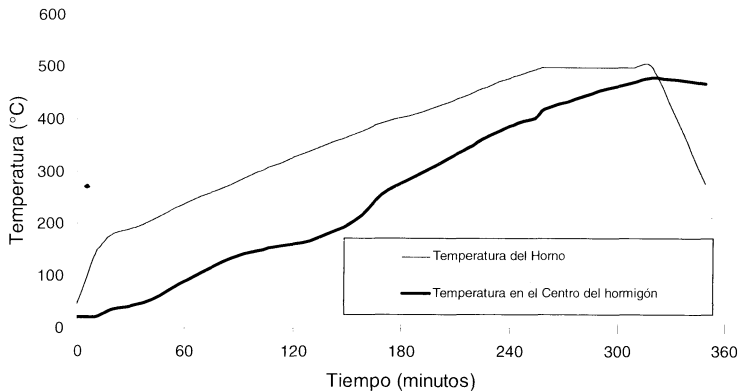


Figura 1. Curvas de elevación de la temperatura del horno y del hormigón.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos sobre el hormigón endurecido para las diferentes condiciones de exposición. También se indican los valores porcentuales referidos al hormigón Control. Cada valor surge del promedio de 3 ensayos.

### Inspección visual

En la inspección visual se detectó que las muestras expuestas a temperatura presentan un importante cuadro de fisuración, más evidente en el caso de los hormigones elaborados con rodados silíceos. Las fisuras se observan con mayor claridad en los hormigones que fueron enfriados en forma brusca (con chorros de agua); cuando el material a elevada temperatura se pone en contacto con el agua, presenta un mapeo muy pronunciado el que posteriormente, al secarse el elemento, prácticamente desaparece a nivel visual. Lo comentado es más notorio para temperaturas de 500 °C.

El hormigón elaborado con canto rodado silíceo, expuesto a 700 °C presenta un grado de fisuración mucho más importante, el cual permaneció luego del enfriamiento, produciéndose en algunos casos el desprendimiento del mortero al recibir el chorro de agua. Este hecho hizo que algunos agregados gruesos quedaran a la vista.

Las muestras que se enfriaron lentamente dentro del horno presentaban también una importante fisuración, observándose en su parte superior una coloración gris clara.

En la Fig. 2 puede observarse el aspecto de las probetas luego de ser calentadas a 500 °C y enfriadas con agua.

Tabla 1. Propiedades del hormigón endurecido.

	PPG					CRS				
	Control	500-a	500-w	700-a	700-w	Control	500-a	500-w	700-a	700-w
Vcil (km/s) (%)	4.67 100	2.74 59	2.36 51	1.02 22	1.51 32	4.66 100	2.92 63	2.47 53	0.40 9	0.52 11
V pr (km/s) (%)	4.75 100	2.63 55	2.52 53	- -	1.16 24	4.78 100	3.13 65	3.08 64	0.57 12	0.67 14
Ed.cil (GPa) (%)	42.0 100	13.7 33	8.6 20	1.3 3	2.9 7	41.9 100	12.7 30	8.3 20	*	*
Ed.pr (GPa) (%)	47.4 100	12.6 27	9.6 20	- -	2.0 4	47.2 100	17.0 36	16.4 35	4.2 9	10.3 22
f'c (MPa) (%)	37.5 100	33.4 89	22.4 60	11.9 32	16.3 43	30.0 100	23.9 80	18.5 62	3.3 11	2.4 8
Es (GPa) (%)	36.4 100	15.5 43	11.0 30	1.9 5	3.9 11	36.8 100	18.2 47	15.3 40	*	*
μ (%)	0.16 100	0.10 62	0.03 19	0.08 50	0.04 25	0.16 100	0.10 62	0.02 12	*	*
f inic (%)	72	70	60	48	53	75	70	70	*	*
f inic (MPa) (%)	27.0 100	23.4 87	13.4 50	5.7 21	8.6 32	22.5 100	16.7 74	13.0 58	*	*
f crit (%)	93	86	75	57	66	96	81	95	*	*
f crit (MPa) (%)	34.9 100	28.7 82	16.8 48	6.8 19	10.7 31	28.8 100	19.2 67	17.4 60	*	*
f cd (MPa) (%)	3.8 100	1.6 42	1.8 47	- -	0.8 21	3.3 100	2.2 67	2.1 64	*	*
f net (MPa) (%)	6.1 100	2.1 34	2.0 33	- -	1.2 20	5.7 100	3.0 53	3.0 53	*	*
G <sub>F</sub> (N/m) (%)	230 100	135 59	200 87	- -	140 61	185 100	140 76	165 89	*	*
f max (mm) (%)	1.6 100	1.6 100	2.4 150	- -	2.0 125	1.5 100	1.4 93	2.0 133	*	*

- Ensayo no programado.
- \* Probeta muy alterada.
- V: Velocidad del pulso ultrasónico (cil.: cilindros; pr.: prismas).
- Ed: Módulo de Elasticidad Dinámico (cil.: cilindros; pr.: prismas).
- f'c: Resistencia a compresión.
- Es: Módulo de Elasticidad Estático (calculados al 40 % de la carga máxima).
- μ: Coeficiente de Poisson
- f inic: Tensión de iniciación.
- f crit: Tensión crítica.
- f cd: Resistencia a tracción por compresión diametral.
- f net: Módulo de rotura a flexión, probeta entallada, carga central.
- G<sub>F</sub>: Energía de fractura
- f max: Flecha máxima.

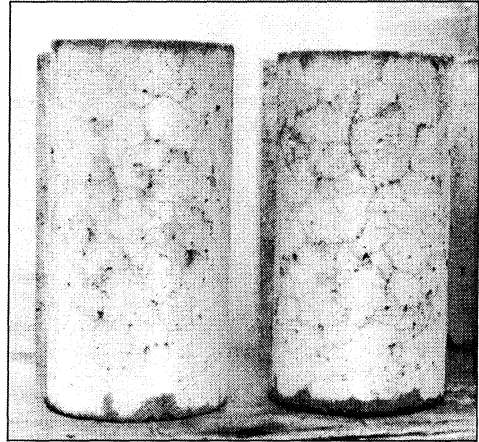


Figura 2. Aspecto de las probetas luego de ser calentadas a 500 °C y enfriadas con agua.

### Velocidad ultrasónica

Analizando los resultados obtenidos con el método ultrasónico en las muestras sometidas a altas temperaturas (Fig. 3), puede observarse que se produce una disminución de la velocidad ultrasónica en ambos hormigones, hecho que se verifica para los dos tipos de enfriamiento empleados. En el caso del enfriamiento lento y temperatura de exposición de 500 °C, se aprecia una disminución de la velocidad cercana al 40% para ambos hormigones mientras que la degradación del material es más acentuada para la temperatura más alta (700 °C) y principalmente para el caso de los hormigones elaborados con rodados silíceos, donde la velocidad residual es del orden del 10%.

Cuando el enfriamiento se realiza con chorros de agua, se produce, para 500 °C, una disminución de la velocidad similar para ambos hormigones y más importante que cuando se enfrían lentamente.

### Módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ )

Los resultados obtenidos con este ensayo indican un comportamiento similar al observado cuando los hormigones fueron evaluados con el método ultrasónico. En la Fig. 4 puede observarse que el módulo de elasticidad dinámico experimenta una disminución más importante que la velocidad para ambos tipos de hormigones y enfriamientos, el cual también es más notorio a medida que se incrementa la temperatura de exposición. En las probetas cilíndricas de los hormigones elaborados con rodados silíceos y expuestas a 700 °C, debido al deterioro producido por el efecto de la elevada temperatura, no fue posible materializar el ensayo para la determinación del módulo de elasticidad dinámico ya que se produjo un incremento del diámetro de las probetas ( $\approx 1.3\%$ ) que imposibilitó su colocación en el equipo sónico.

De los resultados obtenidos surge que el método sónico es mucho más sensible que el ultrasonido en la detección de imperfecciones dentro de los elementos expuestos a altas temperaturas.

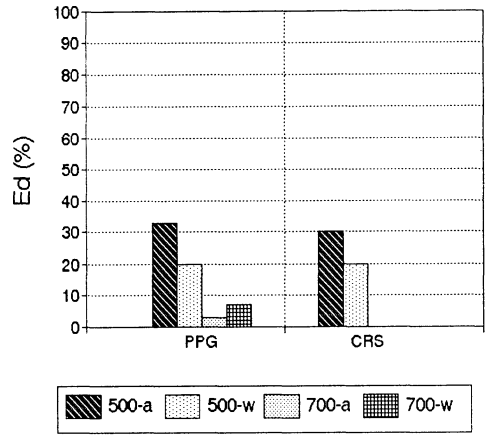
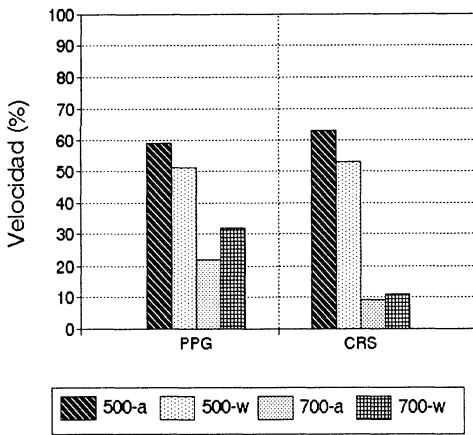


Figura 3. Variación de la velocidad del pulso ultrasónico por efecto de la exposición a altas temperaturas.

Figura 4. Variación del módulo de elasticidad dinámico por efecto de la exposición a altas temperaturas.

**Comportamiento bajo cargas de compresión**

Para el estudio del comportamiento bajo solicitaciones de compresión se emplearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm midiendo en forma simultánea con las cargas las deformaciones axiales y transversales mediante el uso de LVDT. Se determinaron, además de la tensión de rotura ( $f_c$ ), las tensiones de iniciación ( $f_{inic}$ ) y crítica ( $f_{crit}$ ) a fin de analizar aspectos particulares del proceso de rotura del material (8). Cada valor informado en la Tabla 1 surge del promedio de 3 ensayos.

En la Fig. 5 se representan en valores porcentuales la resistencia a compresión de los distintos grupos de probetas referidos al hormigón Control. Es posible observar que la resistencia presenta un comportamiento acorde con los resultados de los ensayos no destructivos (Figs. 3 y 4).

Comparando los hormigones elaborados con ambos tipos de agregado se observa que si bien las reducciones de resistencia son menores en el caso de CRS que de PPG, en las series expuestas a 500 °C estas diferencias no superan el 10 %, verificando cambios en función de la forma en que se haya producido el enfriamiento (menores disminuciones con enfriamiento lento); sin embargo en las series expuestas a 700 °C se observa que mientras en los hormigones con piedra partida los niveles de resistencia finales oscilaron cerca del 35 % de la resistencia de la muestra Control los hormigones con rodados prácticamente se destruyeron y se midieron resistencias 10 veces menores que en el hormigón sin alterar. Por este motivo las medidas de deformación fueron muy irregulares y no merecen ser analizadas.



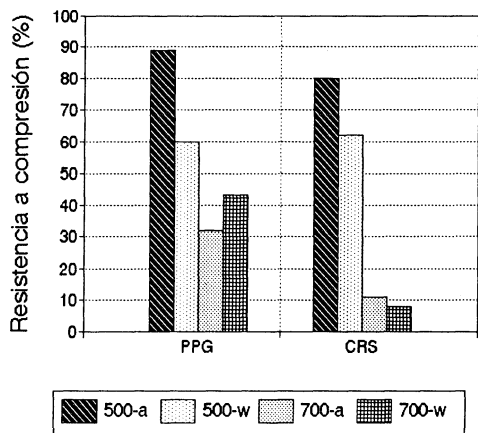


Figura 5. Variación de la resistencia a compresión por efecto de la exposición a altas temperaturas.

El análisis de la deformabilidad para los primeros niveles de carga en las series sometidas a 500 °C, muestra para ambos tipos de agregados reducciones del mismo orden en el módulo de Young y en especial en la relación de Poisson (deformabilidad transversal). Con respecto al módulo de elasticidad en el caso de CRS aparecen reducciones ligeramente menores que en PPG, lo que podría atribuirse a la mayor rigidez del agregado y a la pérdida de entrecruzamiento mecánico a nivel de las zonas de transición en el hormigón PPG. El nivel de afectación es mayor en las muestras rápidamente enfriadas lo que se asocia con una mayor cantidad de grandes fisuras por efecto del shock térmico. (algunas consideraciones sobre la definición del módulo de elasticidad para hormigones muy alterados fueron expuestas en (4)).

En la Fig. 6 a y b se comparan para ambos tipos de agregado las curvas tensión (porcentaje de la tensión de rotura) vs. deformación específica axial correspondiente al hormigón control y a las series expuestas a 500 °C. (se grafica la probeta que más se aproxima al comportamiento medio para las diferentes condiciones de exposición). Se representan la primera, segunda y tercera carga. En ella se pueden distinguir los cambios de rigidez y las deformaciones inelásticas que se producen en los procesos de propagación y cierre de las grandes fisuras inducidas por efecto de las temperaturas.

En la Fig. 7 a y b se presentan las mismas curvas para niveles de tensión de hasta el 40 % de la carga máxima. Si bien en términos generales los efectos sobre los hormigones elaborados con canto rodado son similares a los observados en las mezclas con piedra partida, la degradación es mayor en PPG. Esto es, aunque se producen alteraciones en ambos hormigones, sus efectos repercuten en mayor medida sobre las interfaces con mejor adherencia producto de la textura y forma de la piedra partida. Esto puede deberse no sólo al hecho de que la adherencia fuese de por sí pobre en el entorno del canto rodado, sino también a que la forma de estas partículas facilite menos la aparición de microfisuras. No obstante todo esto es válido hasta los 500 °C, por encima de esta temperatura parece evidente que las características mineralógicas del canto rodado conducen a una profunda alteración de las interfaces que puede llegar a desintegrar al material.

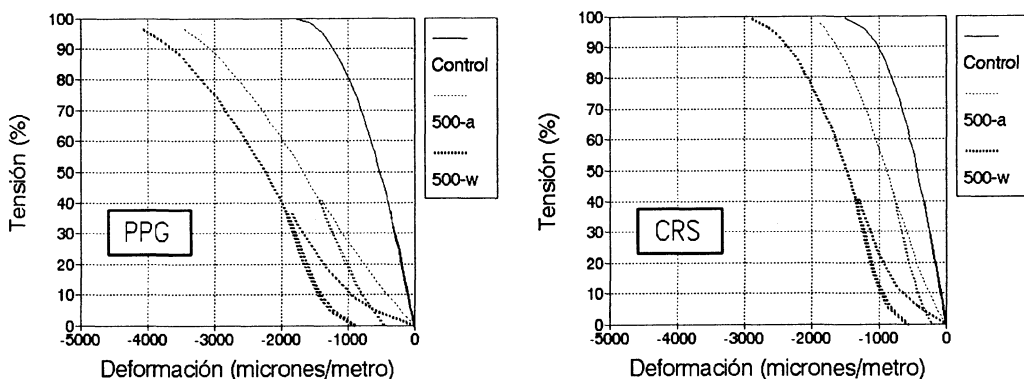


Figura 6. Curvas tensión - deformación longitudinal para cargas de compresión. 1a, 2a y 3a cargas de hormigón Control y hormigones expuestos a 500 °C.  
a) Hormigón PPG. b) Hormigón CRS.

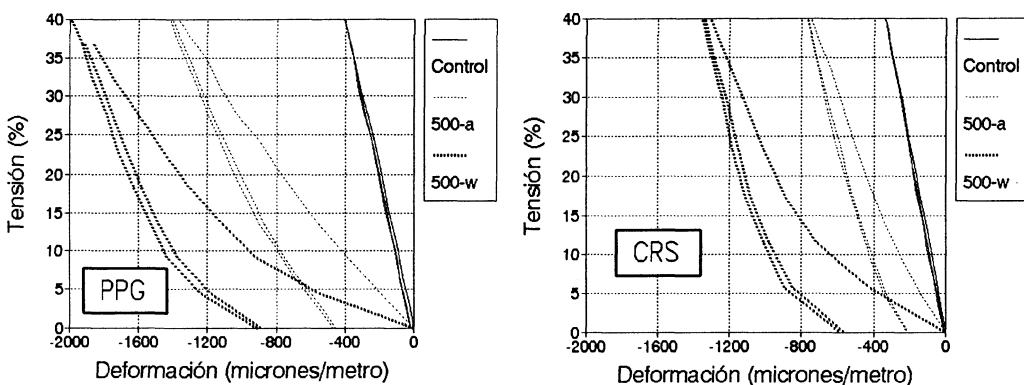


Figura 7. Curvas tensión - deformación longitudinal para cargas de compresión. Detalle hasta el 40 % de la carga última de hormigón Control y hormigones expuestos a 500 °C.  
a) Hormigón PPG. b) Hormigón CRS.

En las series expuestas a 500 °C la deformación residual es del orden de 500  $\mu\text{m/m}$  y 900  $\mu\text{m/m}$  para la piedra partida y de 200  $\mu\text{m/m}$  y 600  $\mu\text{m/m}$  para el canto rodado, siempre mayor para el tipo de enfriamiento más agresivo.

Como fuera observado en ambos casos el hormigón de referencia muestra un comportamiento prácticamente lineal hasta el 40 % de la carga máxima, mientras que en los hormigones sometidos a temperatura la respuesta es no lineal incluso desde niveles

de tensión muy bajos, tanto más cuanto mayores son las alteraciones; a su vez la aplicación de ciclos de carga hace al hormigón Control más lineal y, por el contrario, a los hormigones alterados menos lineales.

A partir del análisis de la variación de la relación de Poisson y de la curva de deformaciones volumétricas se obtuvieron parámetros para la caracterización del proceso de rotura en compresión ( $f_{inic}$  y  $f_{crit}$ . Tabla 1).

El nivel de carga requerido para que se produzca la propagación de fisuras dentro de la matriz (tensión de iniciación) resultó similar, del orden del 70 %, para ambos tipos de agregado.

Por otra parte, para estos tamaños de agregados (19 mm) es habitual que los niveles para los cuales se alcanza un estado de fisuración inestable (tensiones críticas) superen el 90 % de la carga de rotura, la fisuración inducida por altas temperaturas disminuye este porcentaje lo que implica un mayor grado de ramificación en la superficie de falla. Cabe destacar que el valor porcentual en el hormigón con canto rodado es mayor que en el de piedra partida sin alterar (96 vs. 93 %), y que en este último disminuye a medida que se incrementa la temperatura de exposición. En las superficies de fractura del hormigón con canto rodado expuesto a 500 °C y enfriado lentamente se observaron restos de mortero adherido sobre la superficie de los áridos. Este hecho es similar al observado en experiencias previas donde se encontró que la microfisuración por secado en la cercanía de interfaces de partículas redondeadas y de textura lisa como los rodados favorecía una mayor ramificación en el proceso de rotura (9,10). Esto es, si bien se reduce la tensión crítica se extiende el período de propagación inestable y en consecuencia no cambia demasiado el nivel de tensión máxima. Sin embargo cuando aparece un nivel de fisuración más importante, como es el caso del enfriamiento rápido, se redujeron tanto la tensión crítica como la resistencia.

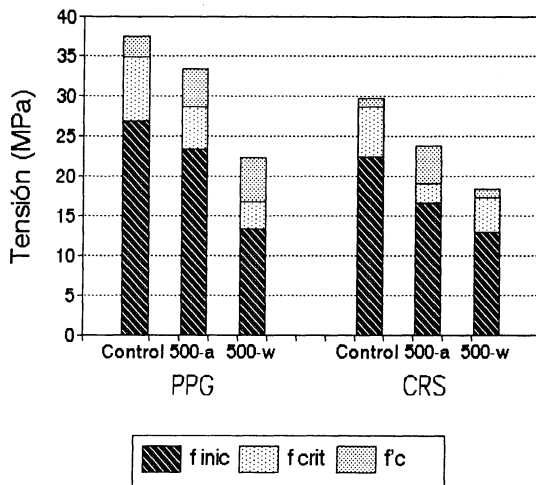


Figura 8. Variación de las tensiones de iniciación, crítica y de rotura por efecto de la exposición a altas temperaturas

En la Fig. 8 se presentan, para cada una de las series, los niveles de tensiones de iniciación, crítica y de rotura. Para ambos agregados y por efecto de la fisuración generada por temperatura el inicio de crecimiento de fisuras de matriz se adelanta, es menor el período de crecimiento estable de fisuras de mortero y, si bien en términos relativos se extiende el período de crecimiento inestable, disminuye la capacidad de control del proceso de propagación de fisuras conduciendo a la rotura en forma prematura. Comparando los resultados de tensión en valores absolutos pareciera surgir nuevamente que la afectación fue mayor en términos relativos para las interfaces de mayor adherencia (PPG).

### Resistencia a tracción y energía de fractura

Los resultados de los ensayos de flexión y tracción por compresión diametral fueron informados en la Tabla 1.

La resistencia a tracción se ve más afectada por la fisuración generada por la exposición a altas temperaturas que la resistencia a compresión. Esto se verifica para ambos tipos de hormigones (CRS y PPG) ya sea que se determine la resistencia a tracción por compresión diametral o a flexión. En el caso del hormigón de piedra partida las reducciones de resistencia fueron mayores que en el de canto rodado, siendo los valores de resistencia luego del calentamiento incluso menores que los de este último. También es posible observar que prácticamente no existen diferencias derivadas del tipo de enfriamiento. En los hormigones con piedra partida la exposición a 500 °C redujo, en promedio, el módulo de rotura y la resistencia a tracción por compresión diametral al 33 y 45 % respectivamente en relación al Control, mientras que en el caso del canto rodado dichos porcentajes fueron iguales a 53 y 65 %. Cuando la temperatura de exposición alcanzó los 700 °C las vigas de CRS se alteraron de forma tal que no fue posible medir las propiedades a tracción.

En la Fig. 9 se muestra para cada serie la curva carga - flecha correspondiente a la probeta que más se aproxima al comportamiento medio. Se verifica para ambos tipos de agregado que la microfisuración por efecto de las altas temperaturas provoca cambios en las curvas carga - flecha tanto en régimen prepico como en el postpico. Mientras los hormigones sin alterar muestran un comportamiento prácticamente lineal antes de alcanzar la carga máxima, los hormigones sometidos a temperatura poseen ramas ascendentes bastante curvas. A veces la deformación para la carga pico resulta menos definida debido a un comportamiento de tipo meseta y una rama de ablandamiento menos abrupta.

En relación a la medida de la energía de fractura se verifica una fuerte incidencia del régimen postpico, mientras las alteraciones provocan una caída de la resistencia ( $f_{net}$ ), la disminución de  $G_F$  no es tan importante debido a la mayor ramificación en la propagación de las fisuras (ver Tabla 1). (La microfisuración extendida a lo largo de la matriz y las interfaces hace que se consuma mucha más energía durante la propagación de la falla). Como era de esperar la energía fue menor en los hormigones con partículas

de forma redondeada y baja adhesión, pero cabe destacar que comparadas con las series sin alterar los cambios de energía fueron de un orden similar para ambos tipos de agregado. Finalmente se debe notar que las flechas de rotura son bastante mayores para el enfriamiento rápido, lo que se asocia al proceso de fisuración mas extendido.

Los valores de resistencia a flexión confirman la degradación que se produce en el hormigón por exposición a las altas temperaturas y posterior enfriamiento, se reitera un efecto interesante del tipo de agregado. Mientras en hormigones sin alterar la resistencia es mayor para agregados de mayor adherencia, en las series alteradas sucede lo contrario, no sólo en términos porcentuales sino también en valor absoluto. Estos hechos también se verificaron cuando se midió la resistencia a tracción por compresión diametral.

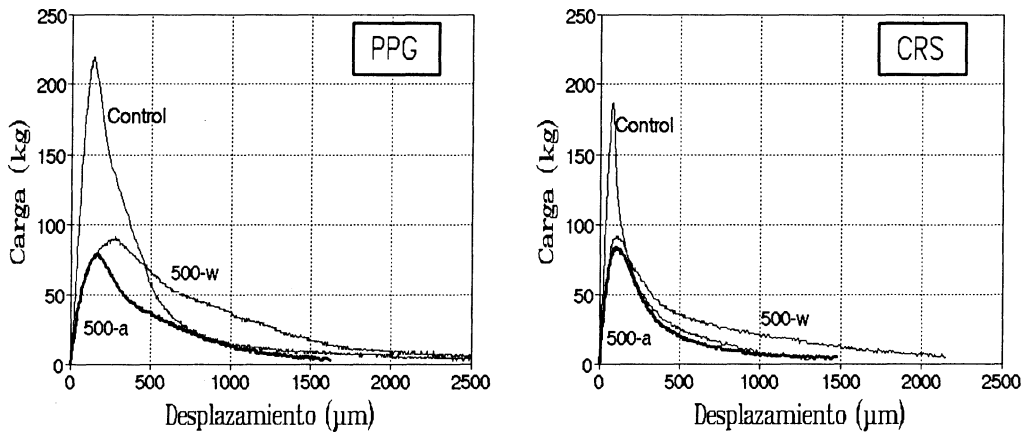


Figura 9. Curvas carga - flecha de vigas entalladas utilizadas para la determinación de la energía de fractura. a) Hormigón PPG. b) Hormigón CRS.

## CONCLUSIONES

Como fuera observado la exposición del hormigón frente a altas temperaturas provoca alteraciones dentro de la estructura del material que afectan en forma significativa su comportamiento mecánico posterior. Se producen cambios en la coloración de las muestras, disminuye la velocidad del pulso ultrasónico y del módulo de elasticidad dinámico, se reduce la resistencia y se modifican las características del proceso de propagación de fisuras incrementando significativamente la deformabilidad del material. Para un mismo tiempo de exposición la temperatura máxima y la velocidad de enfriamiento constituyen variables principales del problema, sin embargo también hay diferencias conforme las características del agregado utilizado.

En este trabajo se analizó la respuesta de hormigones elaborados con dos agregados gruesos de uso muy frecuente en nuestra zona que poseen diferencias significativas en sus características mineralógicas y en la forma y textura de las partículas: canto rodado silíceo y piedra partida granítica. Entre las conclusiones obtenidas merecen destacarse:

- las diferencias producidas por el empleo de ambos agregados fueron menores que las halladas anteriormente ( ) entre hormigones elaborados con un mismo agregado grueso y matrices de diferente nivel resistente para temperaturas de hasta 500 °C.
- se verifica que la degradación del hormigón crece con la temperatura de exposición y la velocidad de enfriamiento, sin embargo estos efectos dependen del agregado utilizado. Para temperaturas máximas de hasta 500 °C el tipo de enfriamiento provocó mayores cambios en el hormigón con piedra partida; es posible asumir que la fisuración generada modifica el proceso de propagación de fisuras en el entorno de las interfaces anulando el efecto de entrecruzamiento mecánico que otorga, fundamentalmente, la textura rugosa de este agregado.
- el enfriamiento rápido (500-w) provocó para ambos agregados una alteración más significativa en la mayoría de las propiedades mecánicas con reducciones en velocidad del pulso ultrasónico, módulo de elasticidad dinámico, resistencia a compresión, módulo de elasticidad estático y relación de Poisson.
- también se verificó que las reducciones en la resistencia a tracción son bastante mayores que las medidas bajo cargas de compresión. Es interesante destacar que en este caso, prácticamente no se encontraron diferencias provocadas por el tipo de enfriamiento para ambos tipos de agregado. Sin embargo el tipo de agregado afecta el nivel de resistencia residual, tanto para solicitaciones de tracción por compresión diametral como de flexión la resistencia del hormigón con canto rodado expuesto a 500 °C fue mayor que la del elaborado con piedra partida no sólo en términos porcentuales sino inclusive en valor absoluto.
- la alteración por exposición frente a altas temperaturas generó cambios en el comportamiento pre y postpico bajo solicitaciones de flexión para los dos hormigones. En ambos casos se verifica la pérdida de linealidad de la rama ascendente y un ablandamiento menos abrupto que reflejan un proceso de fisuración más ramificada. Nuevamente se encontró que el efecto del tipo de enfriamiento fue algo mayor para los agregados de textura rugosa. Asimismo se pudo observar que las diferencias en la forma de la curva de ablandamiento entre hormigón control y hormigones alterados fueron menores cuando se utilizaron agregados redondeados de textura lisa.
- para temperaturas de 700 °C la degradación fue mucho más importante. En este caso el nivel de fisuración interna es tan extendido que hace que el efecto del tipo de enfriamiento resulte secundario. En el hormigón preparado con canto rodado el daño es mucho mayor siendo posible observar incluso probetas completamente destruidas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de un Proyecto de Investigación financiado con subsidios otorgados por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## REFERENCIAS

- (1) Bazant, Z. P. And Kaplan, M. F. "Concrete at High Temperatures. Material properties and mathematical models". Concrete Design & Construction Series, Longman, 1996, p.412.
- (2) Zoldners, N. G.: "Effect of high temperatures on concrete incorporating different aggregates". Proc. Am. Soc. for Testing and Materials, vol. 60, 1960, pp. 1087-1108.
- (3) Di Maio, A.A. y Traversa, L. P.: "Evaluación de hormigones expuestos a temperatura mediante el ensayo Break-Off". IV Cong. Iberoamericano de Patología das Construções, Porto Alegre, Brasil, vol.1, 1997, pp. 153-159.
- (4) Barragán, B.; Di Maio, A.; Giaccio, G.; Traversa, L. y Zerbino, R. "Efecto de las Altas Temperaturas sobre las Propiedades Fisicomecánicas del Hormigón" Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT-CIC, n 5, 1997, pp. 51-64.
- (5) Barragán, B., Di Maio, A., Giaccio, G., Traversa, L. y Zerbino, R. "Características Elasto-Resistentes de Hormigones Expuestos a Altas Temperaturas". Proc. "1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón", AATH, 1-4 junio de 1998, pp. 379-392.
- (6) Giaccio, G. y Zerbino, R. "Interfaces en el hormigón: efecto de la textura del agregado" Rev. Hormigón n 31 AATH, La Plata, 1997, pp. 23-34.
- (7) Giaccio, G. and Zerbino, R. "Failure Mechanism of Concrete: Combined Effects of Coarse aggregates and Strength Level". Advanced Cement Based Materials, Evanston Illinois, Elsevier Ed. USA, v 7, n 1, 1998, pp.41-48.
- (8) Di Maio, A., Giaccio, G. and Zerbino, R. "Failure Mechanism of Concrete, Combined Effects of Coarse Aggregate and Specimen Geometry" Construction and Building Materials, Great Britain, v 10, n 8, 1997, pp. 571-575.
- (9) Giaccio, G. y Zerbino, R. "Estructura y Mecanismos de Deformación y Rotura del Hormigón: Efecto de las Alteraciones en las Zonas de Transición. Primera Parte: Desarrollo Experimental" Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT-CIC, n 5, 1997, pp. 35-50.
- (10) Giaccio, G. y Zerbino R. "Estructura y mecanismos de deformación y rotura del hormigón: efecto de las alteraciones en las zonas de transición. Segunda parte: discusión de conceptos teóricos" Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT-CIC, n 6, 1998, pp. 49-69.