

**ND2012UNLP**

**UNIVERSIDADE:** Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería

**AUTORES:** Ma.Celeste Torrijos; Juan Manuel Tobes

## **COMPORTAMIENTO EN COMPRESIÓN DE HORMIGONES DAÑADOS POR TEMPERATURA**

### **INTRODUCCIÓN**

Las estructuras de hormigón pueden verse expuestas a altas temperaturas durante su vida en servicio debido a diversas situaciones que pueden ser tanto accidentales como de diseño, y esto produce cambios irreversibles en sus propiedades. Los mecanismos de daño en el hormigón producto de la exposición a altas temperaturas se deben a la diferencia entre el coeficiente de expansión térmica de los agregados y la pasta, aumento en la presión de poros y descomposición de los hidratos. Los primeros dos mecanismos inducen tensiones en la pasta y los agregados y el último debilita la resistencia de los hidratos<sup>1,2</sup>.

El agua en el hormigón se encuentra como agua evaporable en poros del S-C-H y capilares, y como agua ligada químicamente en los hidratos del cemento. Durante la vida en servicio el contenido de humedad disminuye hasta un valor de equilibrio que depende del sistema de poros, razón agua-cemento, grado de hidratación, humedad y temperatura ambiente. Al calentar entre 40 °C y 105 °C el agua evaporable se pierde, a una temperatura de 200° C aproximadamente comienza la descomposición del silicato de calcio hidratado y del sulfoaluminato de calcio hidratado y entre los 400 °C y 500 °C se produce la deshidratación del hidróxido de calcio<sup>1,2</sup>.

Durante el calentamiento hay una competencia entre expansión y contracción de la pasta que afecta su microestructura y por lo tanto sus propiedades físicas y mecánicas. Hasta los 105° C debido a la pérdida de agua la pasta se contrae. A mayores temperaturas los agregados se expanden y en general predomina la expansión de éstos sobre la contracción de la pasta por lo tanto el hormigón se dilata<sup>1</sup>. Estas alteraciones dentro de su estructura producto de la exposición a altas temperaturas pueden ser evaluadas mediante ensayos no destructivos y destructivos<sup>3</sup>.

Recientes trabajos han mostrado de qué forma inciden los defectos generados por la exposición a altas temperaturas en las propiedades mecánicas del hormigón. Bajo esfuerzos de compresión se ha observado que los cambios son más importantes en lo que atañe a la deformabilidad que a la resistencia. También se modifican substancialmente las propiedades

de transporte<sup>4</sup>. A su vez las altas temperaturas provocan un mayor deterioro de la resistencia bajo esfuerzos de tracción y generan una propagación de fisuras con mayor ramificación que da lugar a un incremento en la tenacidad relativa (tenacidad / resistencia)<sup>5</sup>. Si bien se ha demostrado la inviabilidad de aplicar ensayos no destructivos como el de la velocidad de pulso ultrasónico para estimar la resistencia en estructuras afectadas por altas temperaturas, ha sido comprobada su capacidad para identificar niveles de degradación y zonas de alteración en estructuras construidas dañadas por alta temperatura<sup>3,6</sup>.

En el presente trabajo se analiza el efecto sobre el comportamiento bajo cargas de compresión de corta y larga duración de hormigones expuestos frente a altas temperaturas. Este estudio se encuadra dentro de una línea de investigación iniciada hace unos años sobre la respuesta mecánica de hormigones expuestos a altas temperaturas y se vincula con el “Proyecto Vida en Servicio de Estructuras de Hormigón”. Además de las consideraciones sobre los casos de aplicación específicos, el tema abordado tiene como objeto analizar el efecto de los defectos en la estructura del hormigón (como fisuras y microfisuras de diverso tamaño) sobre el comportamiento mecánico, y desde este punto de vista se relaciona con otros procesos de degradación del material.

## **DESARROLLO (PROGRAMA EXPERIMENTAL)**

### **MATERIALES**

El presente estudio se realizó sobre un hormigón tipo H17, de consistencia plástica, elaborado en una planta hormigonera empleando cemento portland normal, arena silícea natural y piedra partida granítica de tamaño nominal 6 – 20 mm. Con este material fueron moldeados 40 cilindros de 150 x 300 mm. y 10 prismas de 75 x 105 x 430 mm. con pernos de acero inoxidable insertos en sus extremidades, con el fin de estudiar la variación dimensional por efecto de la exposición a temperatura. Previo al programa específico todas las probetas fueron curadas en cámara húmeda durante 28 días y luego mantenidas en ambiente de laboratorio durante 3 meses. De este modo se garantizaba, luego de un curado efectivo, un nivel de humedad en el interior de las muestras comparable con una estructura en servicio. La exposición del hormigón de probetas saturadas puede conducir a un deterioro significativo por efecto de la presión de vapor que se genera en los poros durante el calentamiento<sup>1</sup>.

## METODOLOGÍA

Las probetas fueron divididas en tres grupos, al primero (14 probetas cilíndricas y 4 prismas) se lo mantuvo en ambiente de laboratorio a 20 °C, el segundo (13 probetas cilíndricas y 3 prismas) fue sometido a una temperatura de 150 °C durante 24 horas, mientras que el tercer grupo (13 probetas cilíndricas y 3 prismas) fue sometido a 500 °C durante el lapso de 1 hora y luego enfriado lentamente. Los grupos se identifican de acuerdo a la temperatura de exposición, 20 °C (Grupo de referencia o control), 150 °C ó 500 °C. La exposición durante 24 horas a 150 °C provoca un grado de contracción similar al que ocurre en un hormigón luego de varios meses de equilibrio con el ambiente (contracción por secado). La exposición a 500 °C representa un caso típico de estructuras afectadas por fuego.

Para la exposición a 150 °C se empleó una estufa con circulación de aire. Para la mayor temperatura se empleó un horno eléctrico con control automático de temperatura y ventilación superior para permitir el escape de gases, aumentando progresivamente la temperatura a razón de 100 °C por hora, luego de mantener el horno a la máxima temperatura durante una hora, las muestras fueron enfriadas dentro del mismo. Estudios previos mostraron un fuerte cambio en el cuadro de fisuración y un mayor deterioro en muestras enfriadas fuera del horno con aplicación de agua<sup>1,2,5</sup>. Tanto en el caso del grupo 150 °C como en el de 500 °C, luego de la exposición las probetas se dejaron en ambiente de laboratorio durante 48 horas antes de proceder a la evaluación del grado de deterioro.

Con el propósito de cuantificar el grado de alteración en la estructura del hormigón se determinaron sobre los prismas medidas de peso y longitud, antes y después de la exposición a altas temperaturas. En el caso de los cilindros fueron medidas la velocidad de pulso ultrasónico y la variación de peso de cada una de las probetas. Se emplearon un equipo James NDT tipo V-meter con una frecuencia igual 54 KHz, una balanza con una precisión de 1 gramo y un comparador de longitudes con una precisión de 0.01 mm (Fig. 1).

FIGURA 1 - EQUIPOS EMPLEADOS



En el grupo de referencia (20 °C) también se repitieron las medidas de peso, ultrasonido y variaciones de longitud, como forma de control luego de realizar la exposición a altas temperaturas sobre los otros grupos.

Cuatro cilindros de cada grupo fueron ensayados a compresión simple, midiendo en forma simultánea a las cargas, las deformaciones laterales y longitudinales. Para ello se dispusieron de transductores tipo LVDT fijos en los marcos de carga que habitualmente se emplean para la determinación del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Una de las probetas fue sometida a una carga monotónica hasta la rotura, mientras que sobre los restantes se aplicaron dos ciclos de carga hasta el 40% de la carga última y luego el tercer ciclo hasta la rotura. Para el cálculo del módulo de elasticidad se utilizó la cuerda entre el 5 y el 40% de la carga última, los valores del coeficiente de Poisson fueron calculados al 40% de la carga última. A partir de las curvas de deformaciones laterales y longitudinales se calcularon las deformaciones volumétricas con el fin de definir la tensión crítica de cada hormigón. El valor de dicha tensión corresponde al pico (mínimo) de la curva de deformaciones volumétricas y se asocia con el inicio de la propagación inestable de fisuras en la matriz<sup>4,8</sup>.

Cinco cilindros de cada grupo fueron sometidos a cargas de larga duración iguales al 40 % de la carga de rotura. Las probetas permanecieron cargadas durante 1 año en una cámara seca ( $T: 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $55 \pm 5 \%$  de humedad relativa), utilizando pórticos con resortes para mantener la carga aplicada.

FIGURA 2 - EQUIPAMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN POR CREEP



En forma paralela un tercer juego de al menos cuatro cilindros fue mantenido sin cargar junto con las probetas cargadas, con el propósito de acotar los cambios en las dimensiones producto de eventuales variaciones de humedad y temperatura en la cámara seca. Para la determinación de las variaciones dimensionales de los cilindros (bajo carga o sin cargar) se empleó un deformómetro de láminas paralelas de 10 pulgadas de base y precisión 0.0001 pulgadas, que mide entre puntos fijos de acero inoxidable pegados a  $120^\circ$  sobre generatrices de cada probeta. Los valores informados corresponden al promedio de las tres determinaciones.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados de pérdida de peso y variación de longitud medidos sobre probetas prismáticas producto de la exposición frente a altas temperaturas. Es posible observar una disminución del peso de un 3.6 % para las probetas calentadas a 150 °C y de un 4.2 % para las expuestas a 500 °C. En lo que se refiere a las variaciones de longitud, las probetas mantenidas en ambiente de laboratorio experimentaron una ligera contracción, pero en el grupo 150 °C la contracción fue de 175 micrones por metro, comparable a la que puede sufrir un hormigón por el proceso de secado en servicio, mientras que, por el contrario, las expuestas a 500 °C sufrieron una expansión de 295 micrones por metro.

TABLA 1 - PÉRDIDA DE PESO Y VARIACIÓN DE LONGITUD MEDIDAS SOBRE PRISMAS

Grupo	Pérdida de peso (%)	Variación de longitud (micrones por metro)
20 °C	0.13	- 40
150 °C	3.62	- 175
500 °C	4.22	295

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos sobre probetas cilíndricas, se incluyen la velocidad de pulso ultrasónico original y la medida luego de la exposición a alta temperatura, así como la pérdida de peso debida a tal proceso. En la misma tabla se informan los valores residuales (luego de la exposición a alta temperatura) de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y tensión crítica medidos durante los ensayos de compresión uniaxial bajo cargas de corta duración.

En la Tabla 2 se puede observar también que las pérdidas de peso son de un orden similar a las medidas sobre los prismas. En cuanto a la velocidad de pulso ultrasónico se observa que, disminuyó un 17% en las probetas calentadas a 150 °C y un 49% en las sometidas a temperaturas de 500 °C, esto se debe a la microfisuración de la matriz. Como era de esperar no existen mayores cambios en el grupo 20 °C.

TABLA 2 - PROPIEDADES MEDIDAS SOBRE CILINDROS ANTES DE APLICAR CARGAS DE LARGA DURACIÓN

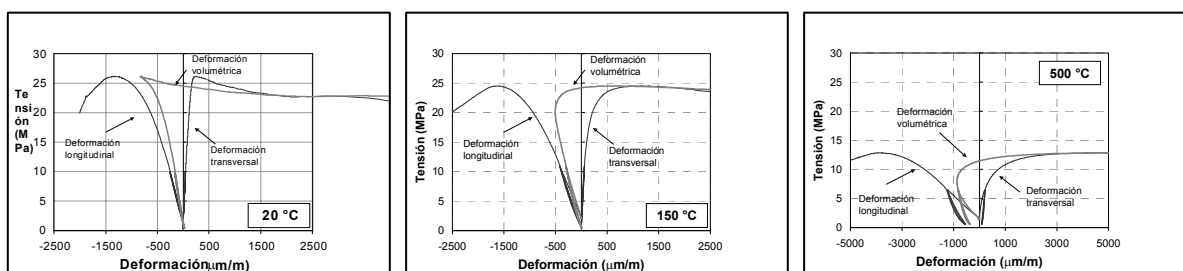
Grupo	Velocidad de pulso ultrasónico (Km/s)		Variación de la velocidad (%)	Pérdida de peso (%)	E (GPa)	Relación de Poisson $\mu$	$f'_c$ (MPa)	$f_{crit}$ (MPa)	$f_{crit}$ (% $f'_c$ )
	Original	Luego de la exposición							
20 °C	4.54	4.48	- 1	0.14	34.5	0.19	25.3	> 24.5	> 98
150 °C	4.53	3.77	- 17	4.48	24.0	0.13	24.1	22	92
500 °C	4.55	2.31	- 49	5.13	12.0	0.11	16.9	12	71

En la Figura 3 se muestran, para cada grupo, las curvas tensión – deformación obtenidas sobre las probetas ensayadas antes del inicio de los ensayos de larga duración. Se representa la probeta que más se aproxima al comportamiento medio de cada grupo. La curva de deformaciones volumétricas es calculada a partir de las medidas de deformaciones laterales y longitudinales.

La resistencia a compresión disminuye a medida que aumenta la temperatura de exposición, para 500 °C la disminución es de un 33% con respecto a las mantenidas en ambiente de laboratorio, pero de menos del 5% para el grupo 150 °C. La gran diferencia que se observa entre las probetas de 500 °C y 150 °C se debe a que las temperaturas inferiores a 200 °C tienen poca incidencia en la resistencia a compresión. Aunque pueden producirse microfisuras durante el secado, también se produce un efecto contrapuesto en la resistencia por consolidación de los productos de hidratación y eliminación de parte del agua entre capas y los poros capilares<sup>1</sup>.

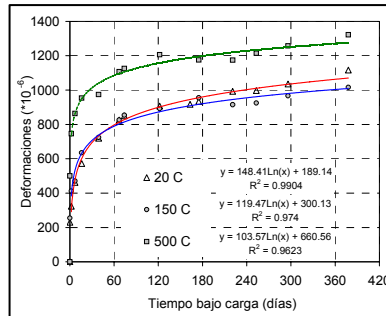
En las curvas tensión-deformación transversal, longitudinal y volumétricas se puede apreciar un comportamiento pre y post pico muy diferente entre las probetas expuestas a alta temperatura. La variación más notable se produce en las calentadas a 500 °C donde se observa una no linealidad más pronunciada entre esfuerzos y deformaciones. Asimismo, existe disminución de la rigidez, representada por la caída en el módulo de elasticidad, que fue del orden del 30 % en las probetas sometidas a 150 °C (a pesar de no existir cambios en la resistencia) y de aproximadamente del 60 % en las expuestas a 500 °C. El módulo de elasticidad es la magnitud más afectada por la acción de la temperatura<sup>7</sup>. De la misma forma el módulo de Poisson sufre una reducción con la temperatura, producto de la degradación<sup>8</sup>. Con respecto a la tensión crítica la mayor disminución se produce a los 500 °C con niveles del 70 % con respecto a la resistencia a compresión, evidenciando el grado de alteración de la estructura, mientras que en el grupo 150 °C alcanza un nivel de aproximadamente el 92 % de la resistencia, lo que indica que las microfisuras afectan el mecanismo de fractura.

FIGURA 3 - CURVAS TENSIÓN – DEFORMACIÓN OBTENIDAS EN ENSAYOS DE CORTA DURACIÓN



En la Figura 4 se muestran para cada grupo las deformaciones medidas bajo cargas de larga duración iguales al 40 % de la resistencia a compresión.

FIGURA 4 - CURVAS TENSIÓN – DEFORMACIÓN PARA CARGAS DE LARGA DURACIÓN



Las deformaciones elásticas instantáneas medidas inmediatamente luego de la aplicación de las cargas fueron de 230, 255 y 500 micrones por metro para los grupos 20 °C, 150 °C y 500 °C, mientras que las estimadas a partir del valor del módulo de elasticidad medido en los ensayos de corta duración considerando la carga aplicada resultan respectivamente iguales a 290, 400 y 560 micrones por metro. Considerando el efecto de las cargas de larga duración se observa una respuesta bastante similar en los grupos 20 °C y 150 °C, mientras que las deformaciones son mayores en el grupo 500 °C. Sin embargo si se considera la diferencia entre las deformaciones totales y las elásticas iniciales surgen valores de aproximadamente 880, 760 y 820 micrones por metro, esto es, las deformaciones diferidas fueron menores en los hormigones afectados por temperatura. Las líneas corresponden al ajuste de las deformaciones diferidas.

## CONCLUSIONES

Los estudios realizados permiten comprobar como diferentes grados de fisuración en la estructura del hormigón dan lugar a cambios en el mecanismo de falla bajo cargas rápidas de compresión y modificaciones en la deformabilidad en el tiempo frente a cargas de larga duración. Próximamente se procederá a la descarga midiendo las recuperaciones elásticas y diferidas, posteriormente se realizarán ensayos de compresión uniaxial a fin de comparar la respuesta de las probetas consolidadas bajo carga con la de aquellas mantenidas sin carga. Desde este punto de vista se contribuirá a un mayor conocimiento del comportamiento de las estructuras de hormigón dañadas por efectos de las altas temperaturas como de aquellas alteradas por otros mecanismos de degradación.

## REFERENCIAS

- BAZANT, Z.; KAPLAN, M. **Concrete at High Temperatures**. London: Longman, 1996.
- GIACCIO, G., DI MAIO, A., VILLA, I.; ZERBINO, R. Propiedades residuales de hormigones preparados con diferentes agregados expuestos a elevadas temperaturas. **Proc. 14ª Reunión Técnica AATH**, Olavarría, v.1, pp.205-212, 2001.
- DI MAIO, A., GIACCIO, G., ZERBINO, R. Non-destructive Tests for the Evaluation of Concrete Exposed to High Temperatures. **Cement, Concrete, and Aggregates**, v. 24, n. 2, p. 58-67, 2002.
- ZERBINO, R. Effects of High Temperature on Residual Mechanical and Transport Properties of Concrete 5th CANMET/ACI **Int. Conf. on Durability of Concrete**, ACI SP-192, p. 983–1000, 2000.
- BARRAGÁN, B., GIACCIO, G., ; ZERBINO, R. Fracture and Failure of Thermally Damaged Concrete Under Tensile Loading. **Materials & Structures**, Paris, v. 34, p.312–319, 2001.
- DI MAIO, A., GIACCIO, G. ; ZERBINO, R. Relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico de hormigones expuestos a altas temperaturas. IN: CONGRESO Iberoam. de Patología de las Const., 5. VII Cong. de Control de Calidad. Montevideo, 1999. v. 1, p 331-338.
- BARRAGÁN, B., DI MAIO, A., GIACCIO, G., TRAVERSA, L.; ZERBINO, R. Características elasto-resistentes de hormigones expuestos a altas temperaturas. In: Congreso . Int. Tecnología del Hormigón, 1. AATH. **Proceedings...**, 1998. p. 379-392.
- GIACCIO, G., ZERBINO, R. Residual properties of concrete exposed to high temperatures In: **Proc. INCONTEST** , Coimbatore, 2003.