

Mejoras en el comportamiento del hormigón de alta resistencia (HAR) a altas temperaturas

Improving the high performance concrete (HPC) behaviour in high temperatures

R. CATTELAN ANTOCIEVES DE LIMA, L. C. PINTO DA SILVA FILHO, C. A. CASONATO

Laboratorio de Ensayos y Modelos Estructurales-LEME. Universidad Federal de Rio Grande del Sur-UFRGS

Fecha de recepción: 19-XII-02

Fecha de aceptación: 25-IV-03

BRASIL

RESUMEN

El hormigón de alta resistencia (HAR) es un material de gran interés para la comunidad científica y técnica, debido a las claras ventajas obtenidas en términos de resistencia mecánica y durabilidad. A causa de estas características, el HAR, en sus diversas formas, en algunas aplicaciones está reemplazando gradualmente al hormigón de resistencia normal, especialmente en estructuras expuestas a ambientes severos. Sin embargo, la microestructura muy densa y la baja permeabilidad típicas del HAR pueden dar lugar a una rotura explosiva bajo ciertas condiciones térmicas y mecánicas, tales como cuando se somete al hormigón a rápidos aumentos de temperatura durante un incendio. Este comportamiento es causado por el aumento de la presión interna del agua en los poros durante el calentamiento, y por las tensiones originadas a partir de los gradientes de deformación térmica. Aunque todavía existe un número limitado de programas experimentales en este área, algunos investigadores sostienen que la incorporación de fibras de polipropileno al HAR puede evitar la rotura explosiva ante la presencia de fuego. Los cambios de comportamiento se producen porque las fibras de polipropileno se funden a altas temperaturas dejando así un camino para que el gas calentado escape de la matriz de hormigón, permitiendo la salida del vapor de agua y ocasionando la reducción de la presión interna de poros. El presente trabajo investiga el comportamiento del HAR a altas temperaturas, especialmente cuando se adicionan a la mezcla fibras de polipropileno.

SUMMARY

High performance concrete (HPC) is an interesting material that has been long attracting the interest from the scientific and technical community, due to the clear advantages obtained in terms of mechanical strength and durability. Given these better characteristics, HPC, in its various forms, has been gradually replacing normal strength concrete, especially in structures exposed to severe environments. However, the very dense microstructure and low permeability typical of HPC can result in explosive spalling under certain thermal and mechanical conditions, such as when concrete is subject to rapid temperature rises, during a fire. This behaviour is caused by the build-up of internal water pressure, in the pore structure, during heating, and by stresses originating from thermal deformation gradients. Although there are still a limited number of experimental programs in this area, some researchers have reported that the addition of polypropylene fibers to HPC is a suitable way to avoid explosive spalling under fire conditions. This change in behavior is derived from the fact that polypropylene fibers melt in high temperatures and leave a pathway for heated gas to escape the concrete matrix, therefore allowing the outward migration of water vapor and resulting in the reduction of internal pore pressure. The present research investigates the behavior of high performance concrete on high temperatures, especially when polypropylene fibers are added to the mix.

PALABRAS CLAVE: hormigón de alta resistencia, alta temperatura, fuego, fibra de polipropileno.

KEYWORDS: high performance concrete, high temperature, fire, polypropylene fiber.

1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad del hormigón, en general, ha sido clave en el comportamiento a largo plazo de las estructuras. El uso de hormigón de alta resistencia (HAR) permite la reducción de la dimensión de los elementos estructurales necesaria para soportar una carga dada, la cual, en algunos casos, puede disminuir la cantidad total de cemento y árido usados, aun considerando que el consumo de cemento del HAR tiende a ser mayor que para el hormigón normal. Además, el ciclo de vida de una estructura de hormigón de alta resistencia aumenta debido a la mayor durabilidad intrínseca (1). Debido a estas características, el HAR, está reemplazando gradualmente al hormigón de resistencia normal, especialmente en estructuras expuestas a ambientes severos.

No obstante, algunos investigadores encontraron diferencias significativas en el comportamiento del HAR a elevadas temperaturas comparado con el hormigón de resistencia normal (HRN). Cuando el HAR es expuesto al calor, el aumento de la presión interna del agua sometida a elevados grados de temperatura genera tensiones locales elevadas, lo cual puede producir una rotura explosiva (2,3).

Según una teoría desarrollada, el HAR es más susceptible a la rotura, en gran parte debido a su baja permeabilidad. La presión de vapor de agua extremadamente alta generada durante la exposición al fuego no puede escapar por la matriz de alta densidad del HAR y, a menudo, alcanza la presión de saturación de vapor (3), generando tensiones de tracción en el material.

La rotura del hormigón se origina a partir de dos procesos simultáneos. El primero, es un proceso termo-mecánico que se relaciona con los gradientes de dilatación térmica que se producen en la estructura; el segundo, un proceso termo-hidráulico que se asocia con la transferencia de masa en la red porosa (aire, vapor, agua), lo cual da lugar a un aumento de la presión y del gradiente de presión en los poros (4). El fenómeno puede, por lo tanto, considerarse como resultado de un proceso termo-hidro-mecánico.

Durante un incendio, la pérdida de hormigón producida por la rotura explosiva ocasiona que capas más profundas se expongan al fuego, aumentando así el acceso de calor a las capas internas de la estructura (3).

Algunos investigadores proponen incorporar fibras de polipropileno al HAR para evitar la rotura explosiva ante la presencia de fuego. Los cambios de comportamiento se producen porque las fibras de polipropileno se funden a altas temperaturas, dejando

1. INTRODUCTION

The durability of concrete in general has always been a key issue for the long-term performance of structures. Now this aspect is being emphasized from a new perspective, since society as a whole, and therefore the scientific community, are more and more concerned with the question of sustainable development. In that respect, the use of high performance concrete (HPC) allows the reduction of the dimension of structural elements necessary to sustain a given load, which can in some cases diminish the total amount of cement and aggregates employed, even considering that the cement consumption of HPC tends to be greater than for normal concrete. Furthermore, the life cycle of a HPC concrete structure is increased due to the greater intrinsic durability of (1). Given these characteristics, HPC, in its various forms, has been gradually replacing normal strength concrete, especially in structures exposed to severe environments.

Nonetheless, some researches have reported that there are significant differences in the performance of HPC at elevated temperatures, when compared with normal strength concrete (NSC). When HPC is exposed to heating, the build-up of internal water pressure under steep temperature gradients generates high local stresses, which may end up causing explosively spalling (2,3).

It has been theorized that HPC is more susceptible to spalling, in great part, because of its low permeability. The extremely high water vapor pressure generated during exposure to fire cannot escape the high-density matrix of HPC and often reaches the saturation vapor pressure (3), generating tensile stresses in the material.

The spalling originates from two simultaneous processes. The first one is a thermo-mechanical process that is related to the thermal dilation gradients taking place in the structure; the second one is a thermo-hydro process that is associated with the transfer of mass in the porous network (air, vapor, liquid water), which results in the build-up of high pore pressures and pore pressure gradient (4). The phenomenon can, therefore, be seen as a result of a thermo-hydro-mechanical coupled process.

Spalling results in the loss of concrete during a fire and has the effect of exposing deeper layers of concrete to fire temperatures, thereby increasing the access of heat to the inner layers of the structure (3).

Although there are still a limited number of experimental programs in this area, some researchers have reported that the addition of polypropylene fibers to HPC is a suitable way to avoid explosive spalling under fire conditions. This change in behavior is derived from the fact that

más espacio para ser ocupado por el gas caliente y, eventualmente, un camino para que éste escape de la matriz de hormigón. Este mecanismo reduciría la presión de poros y permitiría la salida del vapor de agua, resultando en una reducción de las tensiones internas (5-9).

A 160 °C, comienza a producirse la reducción en volumen de las fibras de polipropileno debido a la fusión. A medida que el calor aumenta las fibras se degradan, comenzando a arder a temperaturas cercanas a los 360 °C. A esta altura se produce una regresión de las fibras a sus materiales constitutivos y lo único que permanece de los filamentos individuales es hollín, el cual ocupa aproximadamente un 5% del tamaño original. Los vacíos producidos permiten que el vapor de agua escape. Así, la presión de vapor se reduce o libera y se evita la rotura explosiva al menos por un tiempo (10).

Debido a que la fusión de las fibras de polipropileno transforma al HAR en un material más poroso, al ser expuesto a altas temperaturas se comportará como un hormigón de resistencia normal. No obstante, aunque se evita la rotura explosiva, es necesario determinar la resistencia residual después del fuego, dado que la pérdida de fibras, la creación de poros y los efectos del calor afectarán la resistencia del material (11). El deterioro puede ser tan intenso que requerirá el refuerzo de los elementos.

Algunos investigadores están estudiando la incorporación al hormigón de una combinación de polipropileno y fibras de acero. Con esta mezcla, se supone que se puede evitar el comportamiento de fallo frágil en hormigón de alta resistencia que ocurre sin agrietamiento previo. La mezcla de fibras aumenta la capacidad de deformación al hormigón, mejorando el comportamiento en la fisuración. La fusión de las fibras de polipropileno evita el aumento de la presión y estimula la formación de fisuras antes del fallo, mientras que la presencia de las fibras de acero previene la rotura del recubrimiento de hormigón. De esta forma, se retrasa el aumento de la temperatura en el interior del elemento estructural (12).

En este trabajo se investigan los factores que contribuyen a la rotura explosiva en el hormigón de alta resistencia y se examinan medidas para prevenir el fallo frágil y violento, analizando los efectos de la incorporación de fibras de polipropileno y/o acero a la mezcla.

2. INVESTIGACION EXPERIMENTAL

Se ha llevado a cabo un programa experimental para investigar los efectos de la exposición a altas

polypropylene fibers melt in high temperatures, leaving more space to the heated gas to occupy and, eventually, creating a pathway for the gas to escape the concrete matrix. These mechanisms would reduce pore pressure and allow the outward migration of water vapor, resulting in the reduction of internal stresses (5-9).

At 160 °C, the reduction in the volume of polypropylene fibers due to the melting starts to happen. As the heat increases, the fibers will degrade, beginning to ignite at temperatures close to 360 °C. At this point, the fibers regress to their constituent materials, and all that remains of individual filaments is soot, which occupies approximately 5% of the original size. The voids that remain create the additional space and the routes that let the water vapor escape. So, the vapor pressure is reduced or released and the explosive spalling is avoided, at least for a while (10).

Due to this mechanism, the melting of the polypropylene fiber turns HPC into a more porous material, which will behave more like normal strength concrete when exposed to high temperatures. Nonetheless, although spalling is avoided, it is still necessary to establish the residual strength after fire, since the loss of the fibers, the creation of pores and the effects of the heat will affect the strength of the material (11). The deterioration may be so intense that it will call for the strengthening of elements.

Some researchers are also investigating a cocktail containing a combination of polypropylene and steel fibers to add in the concrete mix. With this mix, it is argued that high performance concrete may avoid brittle failure behavior that occurs without any cracking pattern as a warning. The "fiber-cocktail" adds a larger deformation capacity to concrete that improves crack behavior. The melting of the polypropylene fibers avoids the build-up of pressure and stimulates the formation of cracks before failure, while the presence of steel fibers prevent the concrete cover from spalling. So, the rise of the temperature in the core of the structural element is retarded (12).

The aim of this research is to investigate the factors that contribute to explosive spalling on HPC and to examine measures to prevent the brittle and violent failure, analyzing the effects of the addition of polypropylene or/and steel fibers to the mix.

2. EXPERIMENTAL INVESTIGATION

An experimental program was conducted to investigate the effects of the exposure to high temperatures and to

temperaturas y determinar las propiedades residuales tanto, del hormigón de resistencia normal (HRN) como del de alta resistencia (HAR).

En la primera parte de la investigación, se llevaron a cabo ensayos de determinación de la resistencia a la compresión de probetas, con y sin fibras de polipropileno, y de acero, sometidos a diferentes temperaturas.

2.1. Materiales

Se usaron hormigones con cemento de alta resistencia temprana (tipo V). Como árido fino se usó arena con diámetro característico de 4,8 mm y basalto de 19 mm como árido grueso. FITESA suministró las fibras de polipropileno de 12 mm de largo y 18 micrones de diámetro y BELGO-MINEIRA las fibras de acero de 60 mm de largo y 1 mm de diámetro. Los contenidos de fibras usados en los ensayos fueron 3 kg/m³ y 45 kg/m³ para las fibras de polipropileno y de acero respectivamente. Estos contenidos se definieron después de un análisis de experimentos previos encontrados en la literatura.

2.2. Variables experimentales y proporciones de la mezcla

Las variables experimentales consideradas fueron la resistencia a la compresión del hormigón, la máxima temperatura de exposición, y el tipo de fibra adicionada. Los niveles adoptados se resumen en la Tabla 1.

La resistencia del HAR se limitó a 50 MPa para reproducir los requerimientos que se usaron en proyectos corrientes para producir hormigón durable. Para permitir la combinación de todas estas variables en sus varios niveles, se realizaron seis dosificaciones de mezclas. Éstas se resumen en la Tabla 2.

determine the residual properties of normal strength concrete (NSC) and high performance concrete (HPC) after exposure.

In the first phase of the research, described in this paper, compressive strength tests were carried out in specimens molded with or without polypropylene and/or steel fibers, submitted to different heat exposures.

2.1. Materials

For molding the specimens, a high-early strength cement (Type V) was used. Natural river sand, with a characteristic diameter of 4.8 mm, was used as the fine aggregate, together with a 19 mm basalt coarse aggregate. The polypropylene fibers were supplied by FITESA and had a length of 12 mm and a diameter of 18 microns. The steel fibers were supplied by BELGO-MINEIRA and had a length of 60 mm and a diameter of 1 mm. The fiber contents used in the research were 3 kg/m³, for polypropylene, and 45 kg/m³, for steel fibers. These contents were defining after an analysis of previous experiments found in the literature review.

2.2. Experimental variables and mix proportions

The experimental matrix designed contained, as variables, the compression strength of the concrete, the maximum temperature of exposure, and the type of fiber addition. The levels adopted are summarized in Table 1.

The level of resistance of the HPC was limited to 50 MPa to represent the requirements that are being used to produce durable concrete in current projects. To allow the combination of all these variables in their various levels, six mix proportions were established. These are summarized in Table 2.

TABLA 1/TABLE 1
Niveles de variable dependiente
Dependent variable levels

VARIABLES DEPENDIENTES <i>Dependent Variables</i>		NIVELES/LEVELS	
Tipo de Hormigón <i>Concrete Type</i>	HRN/NSC (20 MPa)	HAR/HPC (50 MPa)	
Temperatura de Exposición (°C) <i>Exposition Temperature (°C)</i>	23	400	800
Mezcla de Fibras <i>Fiber Mix</i>	Polipropileno <i>Polypropylene</i>	Acero <i>Steel</i>	Polipropileno/Acero <i>Polypropylene:Steel</i>

TABLA 2/TABLE 2
Dosificaciones de los hormigones
The mix proportions of the concretes

Grupo/Group	HRN ⁽¹⁾ NSC ⁽¹⁾	HRN-FP ⁽²⁾ NSC-FP ⁽²⁾	HAR ⁽³⁾ HPC ⁽³⁾	HAR-FP ⁽⁴⁾ HPC-PF ⁽⁴⁾	HAR-FA ⁽⁵⁾ HPC-SF ⁽⁵⁾	IAR-FPA ⁽⁶⁾ HPC-PSF ⁽⁶⁾
Cemento/Cement (kg/m ³)	269,61	269,61	382,00	382,00	382,00	382,00
Agua/Water (l/m ³)	188,72	188,72	168,08	168,08	168,08	168,08
Arena/Sand (kg/m ³)	911,28	911,28	725,80	725,80	725,80	725,80
Árido grueso Coarse aggregate (kg/m ³)	1180,89	1180,89	1031,40	1031,40	1031,40	1031,40
Superplastificante Superplasticizer (ml/m ³)	***	***	76,40	76,40	76,40	76,40
Fibra de polipropileno Polypropylene fiber (kg/m ³)	***	3,0	***	3,00	***	3,00
Fibra de acero Steel fiber (kg/m ³)	***	***	***	***	45,00	45,00

⁽¹⁾ HRN: hormigón de resistencia normal

⁽²⁾ HRN-FP: hormigón de resistencia normal con fibra de polipropileno

⁽³⁾ HAR: hormigón de alta resistencia

⁽⁴⁾ IAR-FP: hormigón de alta resistencia con fibra de polipropileno

⁽⁵⁾ IAR-FA: hormigón de alta resistencia con fibra de acero

⁽⁶⁾ HAR-FPA: hormigón de alta resistencia con fibra de polipropileno y acero

⁽¹⁾ NSC: normal strength concrete

⁽²⁾ NSC-PF: normal strength concrete with polypropylene

⁽³⁾ HPC: high performance concrete

⁽⁴⁾ HPC-PF: high performance concrete with polypropylene fiber

⁽⁵⁾ HPC-SF: high performance concrete with steel fiber

⁽⁶⁾ HPC-PSF: high performance concrete with polypropylene and steel fiber

2.3. Método de ensayo

Para los ensayos de compresión se usaron probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm. Todas las probetas se curaron durante 7 días en ambiente controlado a 23 °C y 98% de humedad relativa. Luego se almacenaron a temperatura ambiente durante 21 días, permitiendo alcanzar la humedad de equilibrio con el medioambiente a fin de reducir su contenido de humedad. De no ser así, las probetas serían más susceptibles que los elementos de hormigón normal al efecto destructivo del calor debido al alto contenido de humedad. A los 28 días, las probetas fueron preparadas para la exposición al calor en hornos.

La decisión de exponer las probetas en hornos se tomó porque el desarrollo y control de un fuego real es una operación compleja y los patrones de temperatura son difíciles de predecir y modelar ya que el número de variables involucradas es muy grande y su comportamiento no puede determinarse fácilmente. La simulación de los efectos de exposición a altas temperaturas a través del uso de hornos eléctricos de alta capacidad fue considerada como una estrategia razonable para los fines de la investigación.

Se usaron tres probetas de cada tipo descrito en la Tabla 2 a fin de aumentar el grado de confianza de los resultados obtenidos. Cada lote se compuso de 9 probetas representando tres combinaciones de

2.3. Test method

Concrete cylinders 100 mm x 200 mm were used for the compression tests. All specimens were cured during 7 days in a controlled environment set at 23 °C and 98% relative humidity. After this initial period, they were stored at room temperature for 21 days, allowing them to achieve moisture equilibrium with the environment, in order to reduce their humidity content. Otherwise, the specimens would be more susceptible than normal concrete elements to the deleterious effects of heating, given the high moisture content. At 28 days, the specimens were prepared for the heat exposure in ovens.

The choice of exposing the specimen in ovens was made because the development and control of a real fire is a complex operation and the temperature patterns are difficult to predict and model, since the number of variables involved is very great and their behavior is not easily determined. The simulation of the effects of the exposure to high temperatures by the use of high capacity furnaces was therefore considered as a reasonable strategy for research purposes. Therefore, electrical ovens were used for heating the test specimens.

Three specimens of each type described in Table 2 were used to increase the confidence in the results obtained. Each batch was formed by nine specimens, representing three combinations of variables. The heating rate

TABLA 3/TABLE 3
Resistencia a la compresión residual
Residual compressive strength

Temperatura (°C) <i>Temperature (°C)</i>	Resistencia a la compresión (MPa)/ <i>Compressive strength (MPa)</i>					
	HRN <i>NSC</i>	HRN-PF <i>NSC-PF</i>	HAR <i>HPC</i>	HAR-FP <i>HPC-PF</i>	HAR-FA <i>HPC-SF</i>	HAR-FPA <i>HPC-PSF</i>
Probetas de control <i>Control specimens</i>	19,89	27,20	39,81	47,38	36,16	46,72
400 °C	16,65	15,28	10,96	41,05	25,61	39,10
800 °C	6,61	3,01	10,86	31,74	10,35	17,87

variables. La velocidad de incremento de calor fue 8 °C/min, como las adoptadas por otros investigadores (9) (11). Se mantuvo cada lote al nivel de temperatura máxima (400 °C u 800 °C) durante 30 minutos. Después de este intervalo, el horno se apagó y dejó enfriar hasta que fue posible abrir las puertas. Las probetas se sacaron del horno y fueron enfriadas lentamente al aire hasta alcanzar temperatura ambiente.

Después de 24 horas de exposición, tanto las probetas de control como las expuestas al calor fueron preparadas para los ensayos de compresión. Los ensayos se realizaron usando una máquina de carga universal Shimadzu de 200 toneladas. El procedimiento siguió las normas brasileñas NBR 5739 (13). La carga máxima fue usada como parámetro de control para el programa experimental. Como resistencia característica residual se consideró a la media de los resultados de tres probetas del mismo tipo expuestas a iguales condiciones.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.

3. ANÁLISIS DE DATOS

La evaluación de los resultados se realizó a través de un análisis estadístico usando el programa *Statística*. Se usó un análisis ANOVA para señalar las tendencias más significativas de los datos obtenidos en el ensayo.

3.1. Análisis de los resultados para hormigón de resistencia normal (HRN)

En la Figura 1 se muestra la resistencia a la compresión residual de las probetas calentadas junto con la resistencia original de compresión de control.

En la figura se puede ver que, a temperatura ambiente, la presencia de fibras de polipropileno aumenta la resistencia a la compresión del hormigón. El valor medio de la resistencia en las probetas con fibras, no expuestas al calor, fue casi un 37% mayor que en las de control.

employed was 8 °C/min, as adopted by other researchers (9) (11). Each batch was kept at the maximum temperature level (400 °C or 800 °C) for 30 minutes. After this interval, the oven was turned off and left to cool until it was possible to open the doors. The specimens were then taken out of the furnace and slow cooled in air until reaching room temperature.

After 24 hours of the exposure, both the control specimens and the fire exposed ones were prepared for the compression tests. The tests were done using a computerized universal 200-ton loading machine from Shimadzu. The procedure followed the Brazilian standard NBR 5739 (13). The maximum load was used as the control parameter for the experimental program. The characteristic residual strength was considered as the mean of the results of the three specimens of the same type exposed to the same conditions.

The results obtained are summarized in Table 3.

3. DATA ANALYSIS

*The evaluation of the results was performed by means of an exploratory statistical analysis using the *Statística* software. An ANOVA analysis was used to point out the more significant trends of the test data.*

3.1. Analysis of results for normal strength concrete (NSC)

The trend expressed by the residual compressive strength of the heated specimens, is plotted in Figure 1 alongside the trend for the original compressive strength of the control.

It can be clearly noticed in the figure that, at room temperature, the presence of polypropylene fibers increases the compressive strength of the cementitious matrix. The mean value of the specimens with fibers, non-exposed to heat, was almost 37% higher than the control specimens.

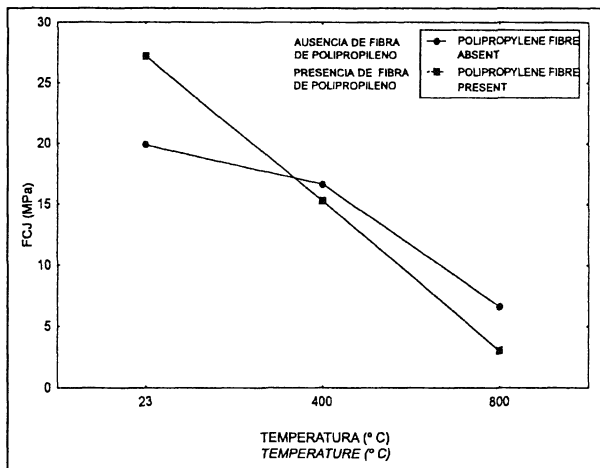


Figura 1.- Resistencia a la compresión residual en HRN.
Figure 1.- Residual compressive strength of NSC.

Sin embargo, después de la exposición la resistencia residual de las probetas sin fibras fue mayor. Este comportamiento puede explicarse porque, a altas temperaturas, las fibras se funden, aumentando la porosidad y perdiendo el efecto beneficioso. Puesto que el hormigón de resistencia normal ya tiene un gran número de poros que permiten escapar el vapor de agua, no hay aumento de la presión interna que pueda originar tensiones de tracción. Por lo tanto, la pérdida de fibras no es útil y no mejora la resistencia al fuego. El aumento de porosidad causado por la fusión de las fibras, de hecho, reduce la resistencia, creando un efecto negativo.

La reducción de la resistencia causada por la presencia de fibras de polipropileno se nota ya a 400 °C, aumentando ligeramente para probetas calentadas a más de 800 °C. Este comportamiento parece indicar que, a 400 °C, una gran parte de las fibras ya se ha fundido pero una pequeña parte permanece activa, probablemente aquellas ubicadas en el centro del elemento donde la temperatura es inferior. Sin embargo, como la inspección visual no detectó un remanente de fibra después de la exposición a 400 °C, este aspecto está siendo investigado.

3.2. Análisis de los resultados para hormigón de alta resistencia (HAR)

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de compresión de las probetas de hormigón de alta resistencia.

En la figura a la izquierda puede verse que, cuando sólo se usa fibras de polipropileno, los efectos por la presencia de fibras son positivos. Al igual que lo ocurrido con el HRN, para probetas no expuestas al calor, la presencia de fibras produce un considerable

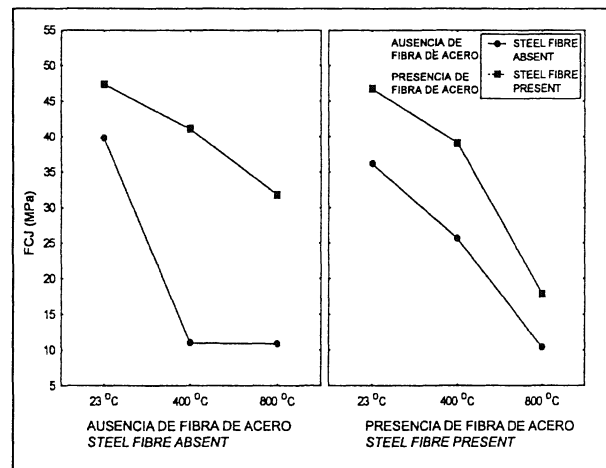


Figura 2.- Resistencia a la compresión residual en HAR.
Figure 2.- Residual compressive strength of HPC.

After exposure, however, the residual strength of specimens without fiber was higher. This behavior can be explained by the fact that, in high temperatures, the fibers melt, increasing porosity and losing their beneficial effect. Since normal strength concrete has already a great number of pores to allow the escape of water vapor, there is no internal build-up of pressure that might create tensile strength. Therefore, the loss of the fibers is not useful and do not improve the resistance to heat. The increased porosity caused by the melting of the fibers, in fact, reduces the strength, creating a negative effect.

The reduction in strength caused by the presence of the polypropylene fibers is already noticeable at 400 °C, increasing slightly for specimens heated up to 800 °C. This behaviour seems to indicate that, at 400 °C, a large portion of the fibers has already melted, but a small parcel is still active, probably the ones in the core of the material, where the heat increase is delayed. However, since visual inspection did not detect any fiber left after exposure to 400 °C, this aspect is being further investigated.

3.2. Analysis of results for high performance concrete (HPC)

Figure 2 contains the graphical representation of the results obtained with the compressive tests done in specimens of high performance concrete.

Analyzing the left part of the figure it can be seen that, when only polypropylene fiber is used, the effects of the presence of fibers is quite positive. Similarly to what was seen for normal-strength concrete, for specimens not exposed to heat, the presence of the

aumento (19%) de la resistencia a la compresión. Sin embargo, para las probetas expuestas al calor, el comportamiento del HAR fue diferente del HRN. Después de la exposición a 400 °C, la resistencia del hormigón se redujo en casi un 90%, cayendo desde 40 MPa a cerca de 11 MPa. Esta resistencia residual se mantuvo para probetas expuestas a 800 °C, indicando que ésta fue probablemente la mínima resistencia del material deteriorado por el calor.

También se puede ver que la presencia de fibras de polipropileno fue muy eficiente para controlar el daño por calentamiento. A 400 °C, la reducción en la resistencia fue sólo de 13%, pero el valor residual fue aún cercano a la resistencia media del hormigón sin fibras. Para las probetas expuestas a 800 °C, la reducción alcanzó 33%, y la resistencia residual fue cercana a 32 MPa, 80% de la resistencia original del hormigón sin fibras de polipropileno no expuestas a calentamiento. Con relación al hormigón normal expuesto a 800 °C, la resistencia del hormigón con fibras de polipropileno expuesto a la misma temperatura fue un 192% mayor.

Cuando se usaron fibras de acero en la mezcla, la resistencia de probetas no expuestas a calentamiento fue levemente menor que la resistencia del hormigón sin fibras. Esto se atribuyó al efecto negativo de las fibras de acero en la trabajabilidad de la mezcla. Aunque el uso de superplastificante corrigió la caída, los datos obtenidos parecen indicar que la introducción de fibras terminan causando la incorporación de aire. Para probetas expuestas a 400 °C, las fibras de acero tienen efecto positivo, porque mantuvieron un 65% de la resistencia original, mientras que probetas sin fibras, a esa temperatura, ya habían sido totalmente dañadas, perdiendo un 90% de la resistencia original como se discutió anteriormente. A 800 °C, sin embargo, las fibras de acero no fueron efectivas, y las probetas con y sin fibras se redujeron a la misma resistencia residual. Esto se atribuye al hecho que, a altas temperaturas, las fibras de acero probablemente sufren considerables variaciones dimensionales alterando su adherencia en el hormigón e inclusive introduciendo tensiones de tracción adicionales en el material.

El efecto negativo de la presencia de fibras de acero a muy altas temperaturas puede también notarse cuando son analizados los resultados de las probetas hechas con una combinación binaria de fibras (acero+polipropileno). Para probetas no expuestas y para las expuestas a 400 °C, las resistencias obtenidas con una combinación de fibras fueron bastante similares a las obtenidas cuando se usaron sólo fibras de polipropileno. Sin embargo, para probetas expuestas a 800 °C, la caída en la resistencia fue mucho más intensa cuando se usaron fibras de acero. No obstante, la

fibers result in a considerable increase (19%) of the compressive strength. For the specimens exposed to heat, however, the behavior of HPC was quite different from NSC. After exposure to 400 °C, the resistance of the concrete was reduced in almost 90%, dropping from 40 MPa to close to 11 MPa. This residual strength was maintained for the specimens exposed to 800 °C, indicating that this was probably the minimum resistance of the heat deteriorated material.

The data also shows that the presence of polypropylene fibers was very efficient to control the heat damage. At 400 °C, the reduction in resistance was only 13%, but the residual value was still close to the mean resistance of the concrete without fibers. For the specimens exposed to 800 °C, the reduction reached 33%, and the residual strength was close to 32 MPa, or 80% of the original resistance of the concrete without polypropylene fiber not exposed to heat. In relation to the normal concrete exposed to 800 °C, the resistance of the concrete with polypropylene fiber after exposure to 800 °C was 192% higher.

When steel fibers were used in the mix, the resistance of specimens not exposed to heat was slightly lower than the resistance of the concrete without fibers. This was attributed to the negative effect of the steel fibers on the workability of the mix. Although the use of more superplasticizer corrected the slump, the data obtained seems to indicate that the introduction of the fibers end up causing the incorporation of air. For specimens exposed to 400 °C, the steel fibers had a positive effect, because they maintained 65% of the original resistance, while specimens without fibers, at this temperature, had already been totally damaged, losing 90% of the original resistance, as discussed above. At 800 °C, however, the steel fibers were not effective, and the specimens with or without fibers were reduced to the same residual strength. This was attributed to the fact that, at high temperatures, the steel fibers probably suffer considerable dimensional variations, disturbing their bonding with the cement matrix or even introducing additional tensile stresses in the material.

The negative effect of the presence of steel fibers in very high temperatures can also be noticed when the results of the specimens made with binary combination of fibers (steel + polypropylene) are analyzed. For specimens non-exposed or exposed to 400 °C, the resistances obtained with a combination of fibers are quite similar to the ones obtained when only polypropylene fibers are used. However, for specimens exposed at 800 °C, the drop in resistance is much more intense when steel fibers are also used. Nonetheless, the presence of polypropylene fibers again seems to

presencia de fibras de polipropileno nuevamente parece reducir los efectos negativos de la exposición al calor. Esto se puede ver por la resistencia residual, cercana a 17 MPa, la cual es casi 55% mayor que la resistencia residual alcanzada por hormigones sin fibras o con fibras de acero solamente (cercanas a 11 MPa).

El programa experimental continuará analizando los resultados obtenidos y extendiendo los ensayos a otros tipos de hormigones, diferentes configuraciones y combinaciones de fibras. Se están llevando a cabo mediciones de permeabilidad y análisis SEM de microestructura, con el objeto de comprender mejor la influencia de la cantidad y geometría de las fibras.

4. DISCUSIÓN

Los resultados del programa experimental indican que, como se esperaba, los hormigones de resistencia normal tienen un comportamiento aceptable frente a la exposición al calor, mientras que hormigones más densos muestran una gran susceptibilidad al daño por calentamiento. Esta tendencia enfatiza la importancia de investigar este tema, fundamentalmente para determinar cómo predecir y controlar el deterioro por calentamiento, ya que la pérdida de resistencia puede ser bastante significativa. El análisis de los datos recogidos indica que, para HRN, donde la porosidad ya es grande, el espacio adicional creado por la fusión de las fibras de polipropileno a altas temperaturas no es necesario para reducir la presión de poros, y la presencia de las fibras reduce la resistencia posteriormente a la exposición aunque aumenta la resistencia de las probetas sin exposición. Para HAR, la incorporación de fibras de polipropileno reduce el daño por calentamiento de las probetas expuestas a 400 °C y 800 °C, indicando que la fusión de las fibras crea un espacio extra y reduce la presión de los poros. La incorporación de fibras de acero resultó útil para controlar el deterioro de las probetas expuestas a 400 °C, pero su presencia no fue efectiva a 800 °C, probablemente debido a la pérdida de adherencia como resultado de la diferencia de las velocidades de deformación entre las fibras y el hormigón circundante. Observando los resultados de las probetas no expuestas, se puede ver que la incorporación de las fibras de acero probablemente produjo problemas de trabajabilidad o una gran incorporación de aire, porque la resistencia fue menor que para las probetas de control.

5. CONCLUSIONES

Resumiendo, los datos preliminares obtenidos en esta investigación indican que el uso de fibras de polipropileno puede ser potencialmente útil para controlar el deterioro de hormigones con

reduce the negative effects of heating exposure at this temperature. This is showed by the residual strength, close to 17 MPa, which is almost 55% higher than the residual strength recorded for concretes without fiber or with only steel fibers (close to 11 MPa).

The experimental program will be continued to validate the results collected and expand the tests to other types of concretes and different configurations and combinations of fibers. In order to better understand the effects of fiber quantity and geometry, permeability measurements and microstructure SEM analysis are also being carried out.

4. DISCUSSION

The results of the experimental program indicate that, as expected, normal strength concretes have an acceptable behavior in face of heat exposure, while more dense concretes show a greater susceptibility to heat damage. This tendency emphasizes the importance of undertaking research about the subject, aiming to determine how to predict and control heat deterioration, since the strength loss can be quite significant. The analysis of the data collected point out that, for normal strength concretes (NSC), where the porosity is already great, the additional space created by the melting of polypropylene fibers at high temperatures is not necessary to reduce pore pressure, and the presence of the fibers just reduces the strength after exposure, although it increases the resistance of the specimens without exposure. For high performance concretes (HPC), the addition of polypropylene fibers reduces the heat damage of specimens exposed at 400 °C and 800 °C, indicating that the melting of the fibers creates extra space and reduces the pore pressure. The addition of steel fibers was useful to control the deterioration of specimens exposed to 400 °C, but its presence was not effective at 800 °C, probably due to the loss of bonding resulting from differential expansion rates of the fiber and the surrounding concrete. Looking at the results for non-exposed specimens, it can be seen that the addition of the steel fibers probably created workability problems or a greater incorporation of air, because the resistance of specimens with steel fiber was lower than for the control specimens.

5. CONCLUSIONS

In summary, the preliminary data collected in this research indicates that the use of polypropylene fibers can be potentially useful to control the deterioration due to heat exposure of concretes with dense

microestructura densa expuestos a la acción de altas temperaturas. Por otro lado, las fibras de acero con las características de las usadas en este trabajo no parecen tener un efecto positivo en la resistencia a altas temperaturas. El uso de mezclas de fibras de acero y polipropileno no fue positivo, ya que la presencia de las fibras de acero provocó una pérdida de resistencia a 800 °C, mientras que para 0 °C y 400 °C el comportamiento fue similar a las probetas que sólo tenían incorporado fibras de polipropileno.

microstructures. On the other hand, steel fibers with the characteristics of the fibers used in this work do not seem to have a very positive effect on the heat resistance for high temperatures. The use of a mix of steel and polypropylene fibers was not positive, since the presence of the steel fibers provoked a strength loss at 800 °C, while for 0 °C and 400 °C the performance was similar to the specimens with only polypropylene fibers.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) P. C. Aitcin: *The art and science of high performance concrete*. 1999. Available: <<http://www.qcl.com.au/pdf-files/HighperfconceAitcen.pdf>>, Access: mar, 19, 2002.
- (2) L. T. Phan, N. J. Carino: *Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature*. Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 58-64. feb. 1998.
- (3) V. K. R. Kodur: *Studies on the fire resistance of high strength concrete at the National Research Council of Canada*. Proc. of International Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, MD. Feb. 13-14, 1997. pp. 75-82.
- (4) P. Kalifa, F.D. Meneteau, D. Quenard: *Spalling and pore pressure in HPC at high temperature*. Cement and Concrete Research, n. 30, 2000.
- (5) P. Kalifa, G. Chéné, C. Gallé: *High temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure*. Cement and Concrete Research, n. 31, 2001.
- (6) L. Kützing: *Fire resistance of high performance concrete with fibre cocktails*. Available: <<http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer>>, Access: jul, 17, 2002.
- (7) M. Bonomi, P. G. Gambarova, A. Meda, P. Setti, S. Zaglio: *On the ultimate capacity of high performance R/C sections at high temperature and after cooling*. Proc. of Third International Conference of Concrete Under Severe conditions, eds. Banthian, N., Sakai, K., Gjorv, O.E., The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 2001. pp.127-133.
- (8) W. Sun, X. Luo, S.Y.N. Chan: *Properties of high performance concrete subjected to high temperature attack*. Proc. of Third International Conference of Concrete Under Severe conditions, eds. Banthian, N., Sakai, K., Gjorv, O.E., The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 2001. pp. 473-479
- (9) T. Takano, T. Horigush, N. Sacki, T. D. Lin, M. Inuzuka, P. J. E. Sullivan: *Residual properties of high strength fiber reinforced concrete exposed to high temperature*. Proc. of Third International Conference of Concrete Under Severe conditions, eds. Banthian, N., Sakai, K., Gjorv, O.E., The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001. pp.489-494.
- (10) A. Kitchen: *Polypropylene fibres reduce explosive spalling in fire*. Concrete, abr. 2001, pp. 40-41, 2001.
- (11) W. Sun, X. Luo, S.Y.N. HAN: *Properties of high performance concrete subjected to high temperature attack*. In: Third International Conference of Concrete Under Severe Conditions (CONSEC'01), 2001, Canadá. Proc. Vancouver: The University of British Columbia, 2001. 2v. v.1. pp. 473-479.
- (12) L. Kützing: *Fire resistance of high performance concrete with fibre cocktails*. Available: <<http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer04/104-19.pdf>>. Access: jul, 17, 2002.
- (13) Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Concreto -- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

* * *