

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN A ALTAS TEMPERATURAS EN EL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS

H. Cifuentes^{1*}, J.D. Rios¹, C. Leiva^{2**}, F. Medina¹

¹Grupo de Estructuras – ETS Ingeniería (Universidad de Sevilla)
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla
*E-mail: bulte@us.es

²Grupo de Ingeniería de Residuos – ETS Ingeniería (Universidad de Sevilla)
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla
**E-mail: cleiva@us.es

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la influencia del tiempo de exposición a altas temperaturas sobre el comportamiento mecánico, en especial en fractura, de hormigones autocompactantes de alta resistencia con y sin refuerzo de fibras de polipropileno. Para ello, se han realizado ensayos normalizados de caracterización de los distintos hormigones y ensayos a flexión en tres puntos para las distintas temperaturas y tiempos de exposición. Las propiedades se han determinado en caliente, no tratándose de propiedades residuales. Los resultados muestran una influencia del tiempo de exposición, así como del refuerzo con fibras, mitigando en este caso los efectos nocivos que las altas temperaturas puedan generar sobre la matriz del hormigón.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras, Comportamiento en fractura, Elevadas temperaturas

ABSTRACT

In this work, the influence of the exposure time to high temperatures on the mechanical behaviour of high-strength self-compacting concrete mixes, plain and polypropylene fibre reinforced concrete, is analysed. Special attention is paid on their fracture behaviour. In this way, standardized tests in order to mechanical characterization of the different mixes are conducted for the different temperatures and time of exposition. The properties are measured directly on heated concrete and not on cooling concrete. The results show the influence of the exposure time, as well as the effect of the fibre reinforcement of the mixes. The presence of polypropylene fibres mitigates the harmful effects that the high temperatures generate in the concrete matrix.

KEYWORDS: Fibre reinforced concrete, Fracture behaviour, High temperatures

1. INTRODUCCIÓN

El ritmo de desarrollo actual de la tecnología del hormigón lleva consigo un aumento en la facilidad de consecución y de utilización de hormigones con mejores prestaciones. En este sentido, la fabricación de hormigones de altas y ultra-altas prestaciones es bastante frecuente [1], permitiendo aplicar este material en estructuras tradicionalmente construidas con acero exclusivamente. Además, teniendo en cuenta la mejora de prestaciones que se pueden conseguir, se encuentran aplicaciones de hormigones de alta y ultra-altas prestaciones en estructuras donde las acciones a las que se encuentra sometido el material durante su fase en servicio son de origen termo-mecánico, encontrándose un acoplamiento entre las cargas mecánicas y térmicas. Es decir, el hormigón está sometido a tensiones importantes a temperaturas elevadas, como en el caso de

los depósitos de almacenamiento de vapor o los sarcófagos de los reactores de las centrales nucleares, entre otros [2].

Normalmente, se procura que las temperaturas que alcance el material resistente en este tipo de aplicaciones estén contenidas por debajo unos valores límite (mediante la utilización de aislamiento con refractario), o se penaliza enormemente su resistencia mediante coeficientes de reducción. Por otro lado, el interés habitualmente mostrado sobre el comportamiento a altas temperaturas de estos hormigones es referente al estudio de la situación de incendio y no a una situación donde el material pueda estar trabajando durante tiempo prolongado a una temperatura elevada [3].

Por los motivos comentados anteriormente, los ensayos habituales realizados sobre hormigón sometido a temperaturas elevadas tienen como finalidad el estudio del comportamiento al fuego de los materiales. En esta situación, la velocidad de calentamiento del hormigón durante el ensayo es elevada y el tiempo de exposición a la temperatura requerida es relativamente corto. En algunas situaciones, resulta interesante conocer el comportamiento del hormigón bajo exposiciones más prolongadas.

En este trabajo se analiza la evolución del comportamiento en fractura y de las propiedades mecánicas de hormigones autocompactantes de alta resistencia con y sin refuerzo de fibras de polipropileno, sometidos a diferentes temperaturas (temperatura ambiente, 100, 300, 500 y 700°C) y tiempos de exposición (6, 24 y 48 horas).

2. MATERIALES

El material empleado en el presente estudio es un hormigón autocompactante de alta resistencia reforzado con micro-fibras de polipropileno. La dosificación del hormigón se ha determinado mediante el procedimiento descrito por Deeb y Karihaloo [1], con ligeras modificaciones particulares de los materiales disponibles en el Laboratorio de Estructuras de la ETSI de Sevilla.

Se han fabricado tres tipos distintos de hormigón. Un hormigón D0 correspondiente al hormigón de control (sin refuerzo de fibras), un hormigón reforzado con fibras cortas de 6 mm (D1) y un hormigón reforzado con fibras largas de 24 mm (D2). Los tres hormigones poseen idéntica matriz, siendo su única diferencia la utilización o no de fibras como refuerzo y la longitud de las mismas. Las fibras tienen un diámetro de 33 μm y una tensión de rotura de 450 MPa. Presentan una temperatura de fusión de 160°C, encontrándose totalmente desintegradas para una temperatura de aproximadamente 450°C. La dosificación de los hormigones Cem/H.Silice/Agua/Arena/Grava/SP es: 0.87/0.13/0.18/1.33/1.72/0.03 con un contenido en cemento CEM-II-B-L/32.5R de 460 kg/m³. El contenido en fibras en el caso de los hormigones D1 y D2 es de 1800 g/m³. La arena es una arena compuesta por arena caliza (14%) de 0/4 y una arena silíceica (86%) de 0/4. La grava es silíceica de machaqueo con un tamaño máximo de 10 mm.

3. ENSAYOS

Como el objetivo principal de este trabajo es el estudio de la evolución de las propiedades mecánicas, en especial de fractura, con la temperatura y el tiempo de exposición y analizar la influencia de la adición de fibras de polipropileno, se han realizado ensayos de compresión simple, ensayos de tracción indirecta y

ensayos de flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas entalladas.

El ensayo a compresión simple se ha realizado sobre probetas cúbicas de 50 mm de lado, siguiendo las indicaciones de la norma UNE EN12930-3:2009. Los ensayos a compresión indirecta (brasileño) se ha realizado sobre probetas cilíndricas de 100×200 mm (diámetro×altura) de acuerdo a la norma UNE EN12930-6:2010. Asimismo, se ha determinado el módulo de deformación longitudinal del hormigón sobre probeta cilíndrica de acuerdo a la norma UNE EN12390-13:2014, cargando hasta 1/3 de la tensión de rotura y midiendo las deformaciones mediante dos transductores LVDT montados sobre dos anillos concéntricos y separados una distancia igual a 2/3 de la altura de la probeta.

Los ensayos para la determinación de la energía de fractura han consistido en ensayos a flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas entalladas, tal y como se indica en la figura 1. Las dimensiones de las probetas son 50×50×200×220 mm (B×D×S×L), la profundidad de entalla ha sido de 25 mm en todos los casos.

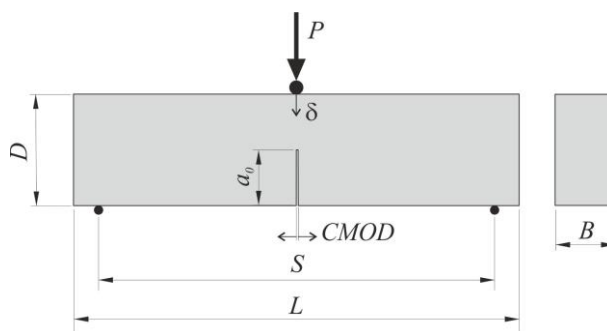


Figura 1. Ensayo a flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas entalladas

En el caso de los ensayos a temperatura elevada las probetas se han calentado en un horno eléctrico durante un tiempo de 6, 24 y 48 horas a temperaturas de 100, 300, 500 y 700°C. Se ha intentado medir las propiedades a 1000°C, pero todas las probetas se han roto tras el calentamiento a dicha temperatura.

Se han intentado medir todas las propiedades del hormigón en caliente. Para ello, se han calentado las probetas en un horno cercano a la máquina de ensayo y tras alcanzar el tiempo de exposición deseado se han extraído del horno y se han ensayado inmediatamente, procurando que la temperatura disminuyera lo mínimo posible. Debido a la imposibilidad de la manipulación de las probetas a temperatura elevada para algunos ensayos y de la colocación de ciertos útiles de medida, los ensayos en caliente presentan las siguientes variaciones:

- Los ensayos a compresión simple se han realizado de la misma forma a temperatura elevada que a temperatura ambiente.

- Los ensayos a tracción indirecta se han realizado únicamente a temperatura ambiente. Como la resistencia a tracción está relacionada con la carga de pico del ensayo a flexión en tres puntos, para las probetas a temperatura elevada se ha analizado la variación de la resistencia a tracción del hormigón mediante el análisis de dicha carga de pico.
- Los ensayos para la determinación del módulo de deformación longitudinal solamente se han realizado a temperatura ambiente. Para temperatura elevada, debido a la imposibilidad de colocar los transductores LVDT necesarios, la variación del módulo de deformación del hormigón se ha analizado mediante la pendiente del tramo prepico de la curva carga-desplazamiento del ensayo a flexión en tres puntos.
- En el caso de los ensayos para la determinación de la energía de fractura se han realizado ensayos a flexión en tres puntos en una máquina dinámica servo-hidráulica con control en desplazamiento. Se ha registrado la curva carga-desplazamiento ($P-\delta$) para todos los ensayos. La determinación de la energía de fractura se ha realizado mediante el método de trabajo de fractura propuesto por RILEM [4]. Se han realizado los ajustes propuestos por Guinea et al. para la determinación de un valor independiente del tamaño [4]. Para ello, se ha realizado el ajuste de la cola de la curva $P-\delta$.

Además, se ha controlado la temperatura de las probetas antes y después del ensayo, con el objetivo de determinar el descenso de temperatura experimentado por el material.

4. RESULTADOS

A continuación, en las figuras 2 a 16, se muestran los resultados obtenidos de la evolución de las propiedades mecánicas de las distintas dosificaciones con el tiempo y la temperatura de exposición.

Los resultados están organizados de tal forma que se presenta una gráfica por cada propiedad y tipo de hormigón.

Además, se muestra también la curva termogravimétrica realizada a la matriz de hormigón (figura 17), que permitirá relacionar el comportamiento mecánico observado en los hormigones con los procesos químicos producidos durante el calentamiento del material.

Se realiza también un análisis de la ductilidad de los hormigones para las distintas temperaturas y tiempos de exposición, en función de la longitud característica, definida por la siguiente expresión:

$$l_{ch} = \frac{G_F E_c}{f_{ct}^2} \quad (1)$$

Siendo G_F la energía de fractura específica del hormigón, E_c su módulo de deformación longitudinal y f_{ct} su resistencia a tracción.

4.1. Resistencia a compresión

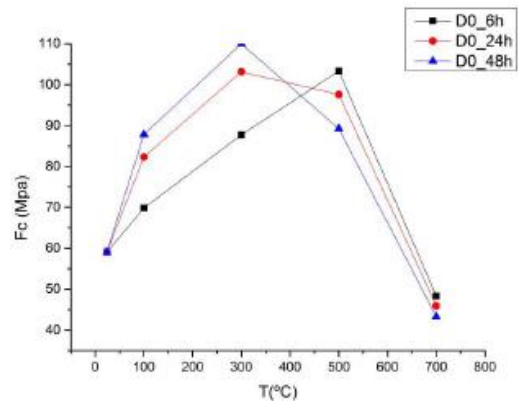


Figura 2. Evolución de la resistencia a compresión con la temperatura para hormigón de control D0

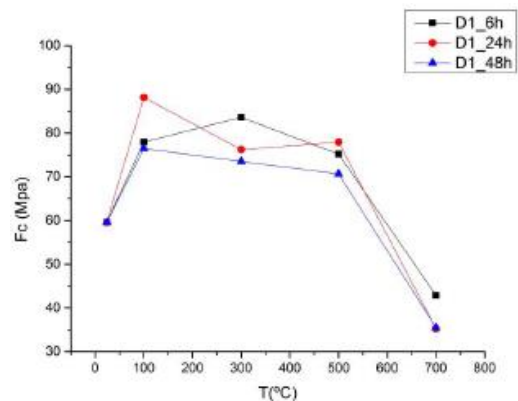


Figura 3. Evolución de la resistencia a compresión con la temperatura para hormigón con fibra corta D1

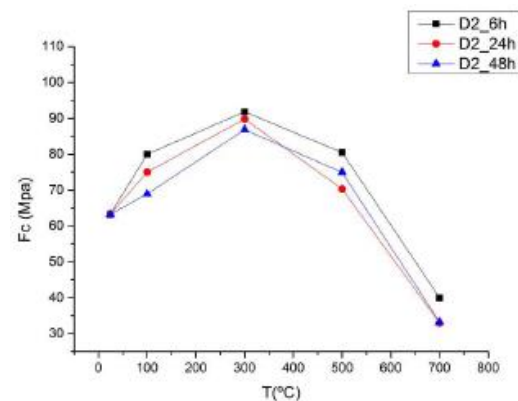


Figura 4. Evolución de la resistencia a compresión con la temperatura para hormigón con fibra larga D2

4.2. Resistencia a tracción indirecta / Carga de pico

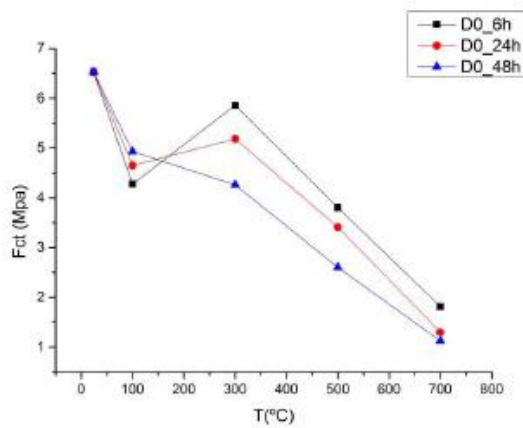


Figura 5. Evolución de la resistencia a tracción con la temperatura para hormigón de control D0

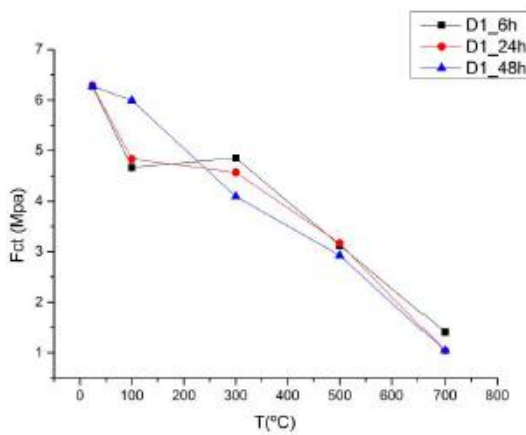


Figura 6. Evolución de la resistencia a tracción con la temperatura para hormigón con fibra corta D1

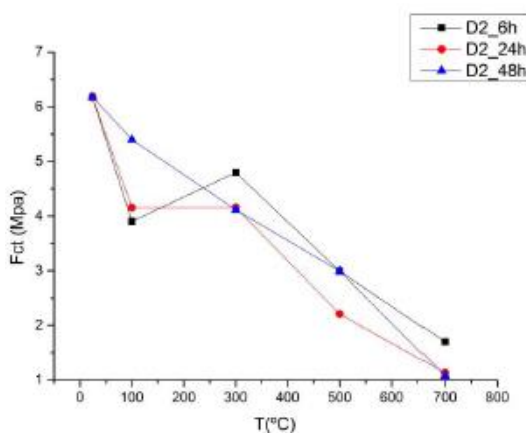


Figura 7. Evolución de la resistencia a tracción con la temperatura para hormigón con fibra larga D2

4.3. Módulo de deformación longitudinal

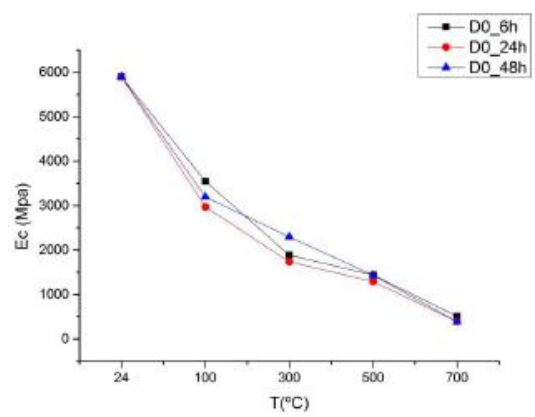


Figura 8. Evolución del módulo de deformación con la temperatura para hormigón de control D0

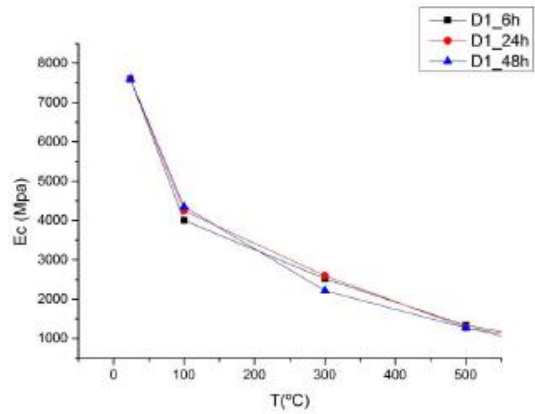


Figura 9. Evolución del módulo de deformación con la temperatura para hormigón con fibra corta D1

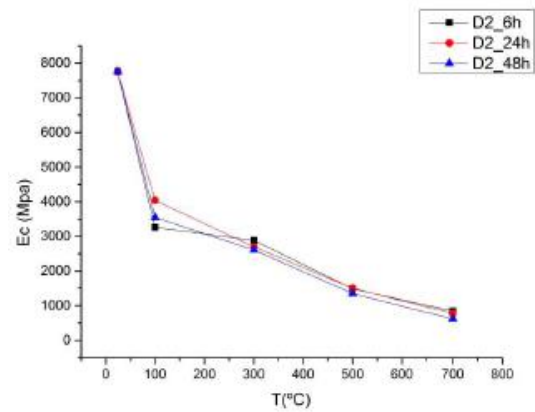


Figura 10. Evolución del módulo de deformación con la temperatura para hormigón con fibra larga D2

4.4. Energía de fractura

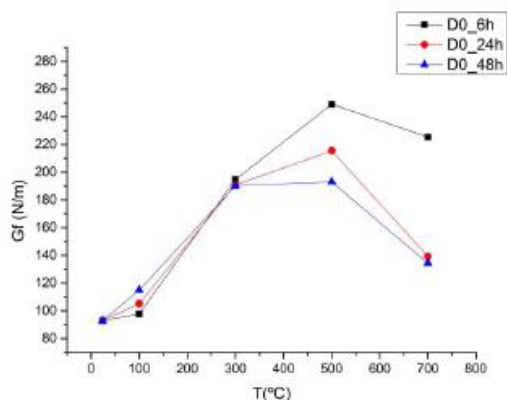


Figura 11. Evolución de la energía de fractura con la temperatura para hormigón de control D0

4.5. Longitud característica

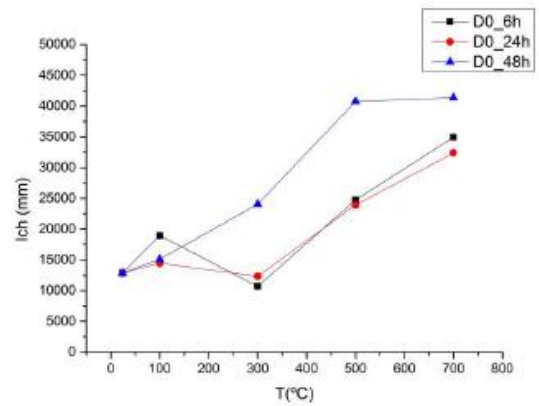


Figura 14. Evolución de la longitud característica con la temperatura para hormigón de control D0

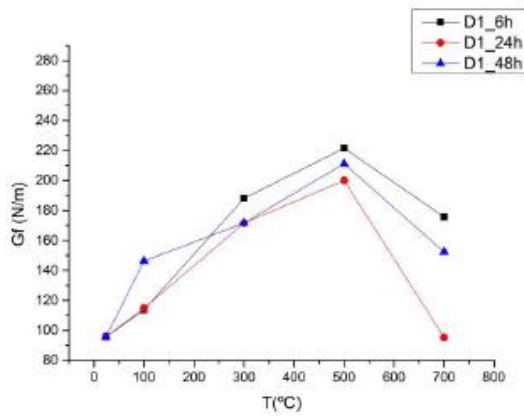


Figura 12. Evolución de la energía de fractura con la temperatura para hormigón con fibra corta D1

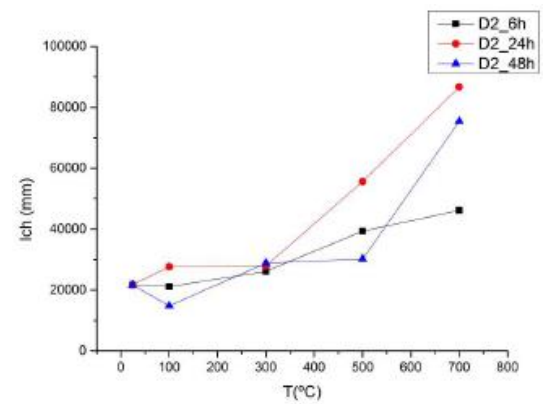


Figura 15. Evolución de la longitud característica con la temperatura para hormigón de control D0

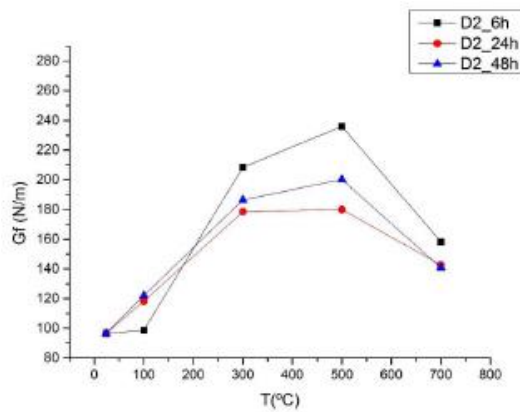


Figura 13. Evolución de la energía de fractura con la temperatura para hormigón con fibra corta D1

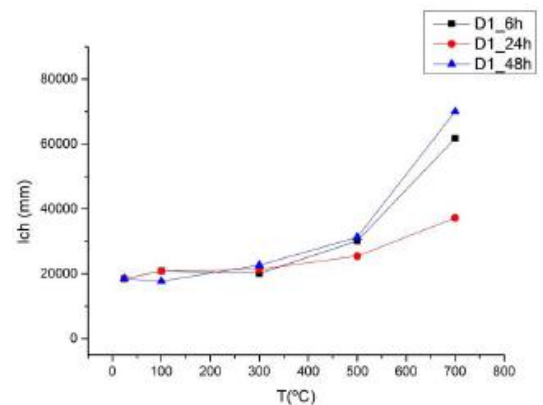


Figura 16. Evolución de la longitud característica con la temperatura para hormigón de control D0

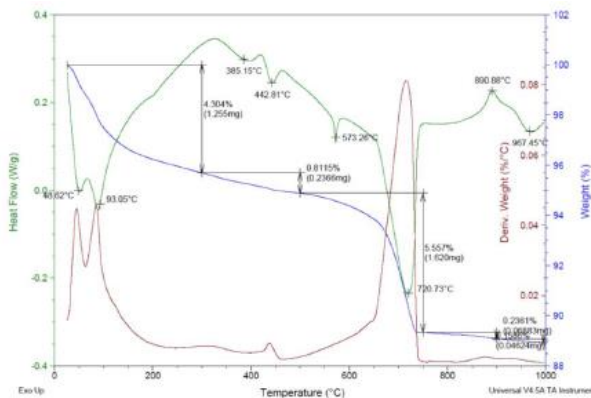


Figura 17. Curva termogravimétrica de la matriz de hormigón

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se observa, respecto a la resistencia a compresión del hormigón, se produce un aumento de la misma con la temperatura, hasta un determinado valor, y el tiempo de exposición. Este efecto es debido a la pérdida de humedad que se produce en el hormigón, así como al aporte de energía que facilita la hidratación del cemento que se haya podido quedar sin hidratar durante el curado. A partir de determinado valor de la temperatura se produce la descomposición del hormigón (figura 17).

En la tensión de tracción indirecta se observa una disminución de la misma con la temperatura y el tiempo de exposición. El efecto beneficioso que puede tener el aumento de temperatura se ve superado por la microfisuración experimentada por el calentamiento del hormigón, lo que produce un descenso para todas las temperaturas. Este descenso es más acusado en los hormigones reforzados con fibras, debido a la modificación de la matriz del hormigón por la presencia de las fibras. Análoga apreciación se puede realizar de la evolución del módulo de deformación longitudinal.

Respecto a la energía de fractura, se observa como a temperatura ambiente el refuerzo con fibras de polipropileno produce un aumento notable de la misma. Además, se observa que los efectos, tanto favorables como desfavorables, que presenta el calentamiento de los mismos, se encuentran más acentuado para mayores tiempos de exposición. La adición de fibras, mejora los efectos positivos del calentamiento de los hormigones sobre la energía de fractura y atenúa los efectos negativos.

Analizando la evolución de la longitud característica de los hormigones se aprecia de forma notable el efecto del tiempo de exposición, la temperatura y la adición de fibras. Por regla general, los hormigones reforzados con fibras presentan mayor longitud característica que el hormigón de control para todas las temperaturas y tiempo de exposición. Además, esta longitud característica aumenta notablemente con el tiempo de

exposición a altas temperaturas. Este efecto es debido a la mayor disminución de la resistencia a tracción del hormigón respecto al efecto sobre el resto de propiedades que afectan al valor de la misma.

6. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados se establecen las siguientes conclusiones generales:

- El tiempo de exposición a temperatura elevada influye sobre las propiedades mecánicas y en fractura de los hormigones analizados.
- La adición de fibras de polipropileno disminuye los efectos negativos del calentamiento del material y reduce la diferencia entre distintos tiempos de exposición.
- La energía de fractura de los hormigones analizados aumenta con la adición de fibras de polipropileno en todas las temperaturas y tiempos de exposición.
- La ductilidad de los hormigones aumenta con la temperatura y el tiempo de exposición, debido a la disminución de la resistencia a tracción. La adición de fibras al hormigón aumenta notablemente su ductilidad para todas las temperaturas y tiempos de exposición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida para la realización de esta investigación por parte del Ministerio de Economía y Competitividad mediante el proyecto BIA2013-48352-P.

REFERENCIAS

- [1] R. Deeb, B. L. Karihaloo, Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes, *Magazine of Concrete Research* **65**(9), 546-556, 2013.
- [2] F. Medina-Reguera, H. Cifuentes, F. Medina, Contact modeling of the duct-concrete interface in the evaluation of multi-strand effect in high curvature post-tensioned tanks, *Key Engineering Materials* **681**, 197-213, 2016.
- [3] H. Cifuentes, C. Leiva, F. Medina, C. Fernández-Pereira, Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC, *Magazine of Concrete Research* **64**(5), 457-470, 2012.
- [4] H. Cifuentes, F. García, O. Maeso, F. Medina, Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC, *Construction and Building Materials* **45**, 130-137, 2013.