

Estudio del comportamiento de hormigones de muy alta resistencia sometidos a cargas de choque térmico

Analysis of the behavior of very high strength concrete subjected to thermal shock loading

Héctor Cifuentes Bulté^a, José David Ríos Jiménez^b y Antonio Martínez de la Concha^c

^a Prof. Titular. Dr. Ing. Industrial. ETS Ingeniería. Universidad de Sevilla

^b Investigador. Dr. Ing. Industrial. ETS Ingeniería. Universidad de Sevilla

^c Prof. Asociado. Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos. ETS Ingeniería. Universidad de Sevilla

RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento mecánico de hormigones de muy alta resistencia, reforzados con fibras, tras haber sido expuestos a cargas de choque térmico. Se analizan dos tipos de hormigones, uno sin ningún tipo de fibra (hormigón de control) y otro reforzado con fibras de acero y de polipropileno. Estos hormigones se han sometido a un proceso de calentamiento hasta 300°C y se han enfriado de distintas formas, desde enfriamiento lento en el interior del horno a enfriamiento rápido en agua. De esta forma, se analiza la influencia de la velocidad de aplicación de las cargas de enfriamiento sobre sus propiedades mecánicas.

ABSTRACT

This paper analyses the mechanical behavior of very high strength concrete, reinforced with fibers, after being exposed to thermal shock loads. Two types of concrete are analyzed, one without any fiber (control concrete) and another reinforced with steel and polypropylene fibers. These concretes have undergone a heating process up to 300°C and have cooled in different ways, from slow cooling inside the oven to rapid cooling in water. In this way, the influence of the application speed of cooling loads on their mechanical properties is analyzed.

PALABRAS CLAVE: hormigones de muy alta resistencia, choque térmico, fibras, enfriamiento.

KEYWORDS: very high strength concrete, thermal shock, fibers, cooling

1. Introducción

Los hormigones de muy alta resistencia poseen propiedades mecánicas mucho más elevadas que las que presenta un hormigón convencional. En este sentido, se pueden alcanzar fácilmente resistencias a compresión del orden de 200 MPa y resistencias a flexo-tracción de 30 MPa [1]. Este aumento tan notable de sus propiedades mecánicas se debe a una mayor compactación de

su matriz cementicia y a la presencia de una gran cantidad de fibras de acero para reforzar su resistencia a tracción. Se trata, por tanto, de hormigones reforzados con una dosificación muy elevada de fibras de acero sobre una matriz muy densa. De esta forma, el comportamiento de estos hormigones es diferente respecto al de

un hormigón convencional, sobre todo si se encuentra sometido a altas temperaturas.

Una de las aplicaciones de interés de este tipo de materiales es su utilización en estructuras destinadas al almacenamiento o generación de energía, como pueden ser depósitos de almacenamiento de vapor en plantas termosolares o en tanques de sales [2]. Estos hormigones permiten superar barreras tecnológicas que ni siquiera el acero permitiría, o bien abaratan el coste de la alternativa en acero, haciendo asumible su construcción. Es evidente, que en este tipo de aplicaciones el material debe soportar temperaturas elevadas, siendo de gran importancia el conocimiento del comportamiento de este tipo de materiales a altas temperaturas. En un trabajo previo, los autores han analizado el comportamiento de hormigones de muy alta resistencia sometidos a temperaturas de hasta 300°C, llegando a la conclusión de la importancia de la microestructura del material y la necesidad de añadir fibras de polipropileno para reducir el daño térmico.

En trabajos previos, entre los que cabe destacar los realizados por algunos de los autores [3], [4], se ha puesto de manifiesto la efectividad de la adición de fibras de polipropileno para reducir el daño térmico que se genera. Sin embargo, son pocos los estudios que se pueden encontrar sobre el comportamiento de los hormigones de muy alta resistencia sometidos a temperatura elevada y aun más escasos cuando están sometidos a cargas de choque térmico. Este tipo de sollicitación se puede producir fundamentalmente por enfriamiento brusco del material caliente y puede provocar un daño térmico distinto debido a la velocidad de enfriamiento.

En este trabajo se analiza la influencia del choque térmico en el proceso de enfriamiento de hormigones de muy alta resistencia reforzados con fibras de acero y de polipropileno. Para ello se someten distintas probetas de hormigón a un proceso de calentamiento hasta 300°C para

posteriormente proceder a su enfriamiento a distintas velocidades. Así, se ha analizado las propiedades mecánicas, incluyendo energía de fractura, residuales de los hormigones (reforzado y sin reforzar como hormigón de control) tras someterlos a un enfriamiento lento en el horno, rápido en aire e inmersión brusca en agua.

2. Materiales y métodos

2.1 Fabricación de los hormigones de muy alta resistencia

Como ya se ha comentado, se han analizado dos tipos de hormigones de muy alta resistencia, uno de ellos reforzado con fibras de acero y polipropileno y otro sin ningún tipo de refuerzo, como hormigón de control. El diseño de los hormigones se ha realizado de acuerdo con los trabajos de Deeb y Karihaloo [5]. En la Tabla 1 se muestra la dosificación empleada para cada hormigón.

Tabla 1. Dosificación de los hormigones en kg/m³.

Componente	D0	DSLPP
Cemento	544	544
Humo de sílice	214	214
Escoria de alto horno	312	312
Arena fina (<315 µm)	470	470
Arena gruesa (<800 µm)	470	470
Superplastificante (BASF ACE325)	42	42
Fibras cortas de acero (OL 13/0.2)	0	98
Fibras largas de acero (C80/30BP)	0	98
Fibras de polipropileno (24 mm)	0	1.2
Relación agua/cemento	0.34	0.34
Relación agua/mat. cem.	0.17	0.17

Como se observa, la única diferencia entre el hormigón DSLPP y el hormigón de control, D0, es la ausencia de fibras en este último.

Ambas mezclas, D0 y DSLPP, se prepararon en una hormigonera vertical donde se fueron añadiendo en primer lugar los materiales secos, alternando los más gruesos con

los más finos, empezando por la arena gruesa y el cemento. Se mezclaron todos los materiales durante 5 minutos previamente a la adición del agua para asegurar una mezcla homogénea. Posteriormente se añadió el agua mezclada junto con el superplastificante. Una vez añadidos todos los componentes, la mezcla estuvo amasando unos 30 minutos hasta observar una pasta de hormigón fresco fluida. Una vez transcurrido este tiempo, en el caso del hormigón reforzado (DSLPP), se añadieron las fibras y se continuó mezclando durante al menos 10 minutos más.

2.2 Preparación de probetas

Con cada mezcla se procedió al llenado de ocho probetas prismáticas de $100 \times 100 \times 440 \text{ mm}^3$, seis probetas cúbicas de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ y dos probetas cilíndricas de $\Phi 100 \times 200 \text{ mm}^3$ como se puede observar en la Figura 1. Todos los moldes presentan las dimensiones normalizadas indicadas en la norma UNE EN 12390-1 [6]. Las probetas serán desmoldadas pasadas 24 horas, para su posterior curado en agua durante 28 días.



Figura 1. Fabricación de probetas.

2.3. Calentamiento y enfriamiento de las probetas

Con el objetivo de analizar la influencia de cargas de choque térmico durante el enfriamiento de las probetas, estas se han sometido a un proceso de calentamiento y distintos procesos de enfriamiento. Algunas probetas no se han sometido a ningún tipo de afección térmica, para

ser utilizadas de referencia en un análisis comparativo de resultados.

Todas las probetas sometidas a enfriamiento han sido previamente calentadas en un horno eléctrico a una velocidad de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta los 300°C y se han mantenido a esta temperatura durante 24 horas. Posteriormente han sido enfriadas de tres formas distintas:

- i) Enfriamiento lento dentro del horno.
- ii) Enfriamiento al aire. Se extraen del horno y se dejan enfriar al aire libre.
- iii) Enfriamiento en agua. Se extraen del horno y se depositan en un baño de agua (Figura 2).

Aunque no se ha medido la velocidad de enfriamiento de las probetas, es fácil comprender que la velocidad de enfriamiento en los tres procedimientos es muy distinta, siendo el enfriamiento en agua el de mayor velocidad.



Figura 2. Enfriamiento en agua de las probetas.

2.4 Ensayos

2.4.1. Ensayo de compresión simple

Las probetas cúbicas se sometieron a un ensayo de compresión simple de acuerdo a la norma EN 12390-3:2009 [6]. Con el objeto de determinar el módulo de deformación longitudinal del hormigón, sobre las caras de estas probetas se colocaron bandas extensométricas para medir las deformaciones durante el ensayo. En la Figura 3

se muestra una de las probetas cúbicas ensayadas con banda extensométrica.

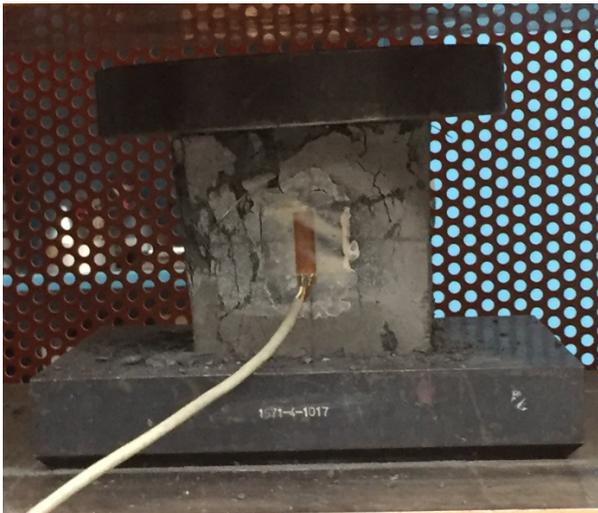


Figura 3. Probeta con banda extensométrica sometida a ensayo a compresión simple.

2.4.2. Ensayo a flexión en tres puntos

Para la caracterización del comportamiento en fractura de los materiales, tras los procesos de enfriamiento, se han realizado ensayos a flexión en tres puntos sobre probetas entalladas. En la Figura 4 se muestra una fotografía de uno de los ensayos.

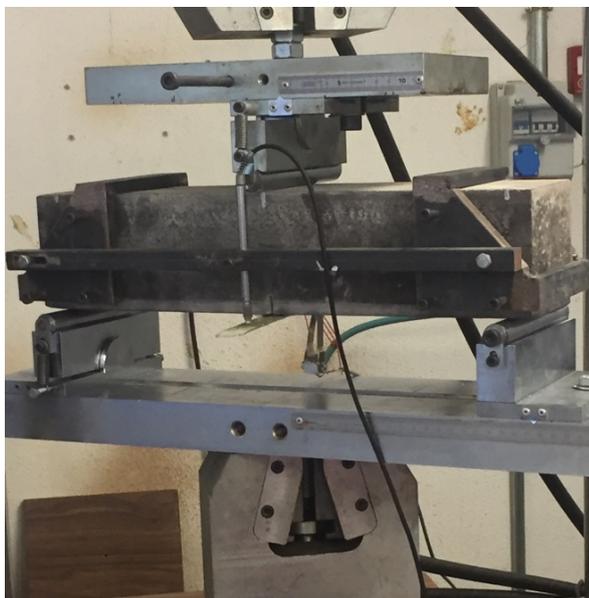


Figura 4. Ensayo a flexión en tres puntos.

La distancia entre apoyos es de 400 mm y la profundidad relativa de entalla de 1/6, por lo que la profundidad de entalla ha sido de 17 mm. Los apoyos son antitorsión y consisten en rodillos deslizantes. Se ha medido el

desplazamiento vertical de la sección central mediante un transductor LVDT, montado sobre un marco rígido que gira solidario con la probeta. Además, se ha colocado un transductor de pinza en la boca de la grieta para medir su apertura.

El ensayo se ha realizado con control en desplazamiento hasta la rotura de las probetas en el hormigón D0 y hasta el máximo de la medida del transductor en el hormigón DSLPP.

La energía de fractura se ha determinado mediante el método de trabajo de fractura RILEM [7] y con las correcciones propuestas por Elices et al. [8]–[10].

3. Resultados y discusión

3.1 Resistencia a compresión

Las Figs. 5 y 6 muestran la resistencia a compresión simple de los hormigones D0 y DSLPP respectivamente, para los distintos procesos de enfriamiento.

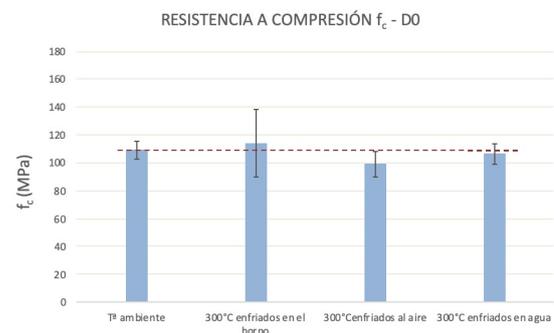


Figura 5. Resistencia a compresión hormigón D0.

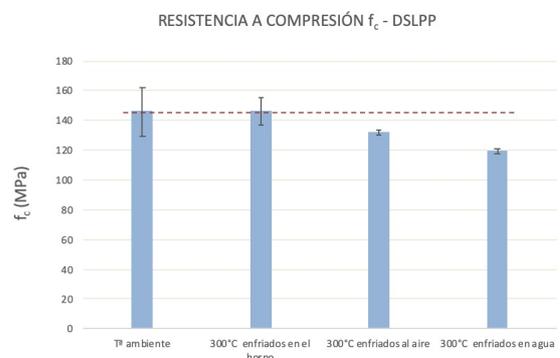


Figura 6. Resistencia a compresión hormigón DSLPP.

Como se puede apreciar en la Figura 5, una vez calentado el hormigón D0 y posteriormente

enfriado en el horno, se produce un aumento de la resistencia a compresión del 4%. Esto es debido a que el vapor de agua generado por el aumento de temperatura puede ser evacuado del hormigón a través del mayor número de poros generados como consecuencia del incremento de temperatura [3], evitando presiones internas indeseadas en los poros y promoviendo la hidratación del cemento a su paso [11].

Como se puede observar en la Figura 5, tras las dos formas de choque térmico que se han ensayado (enfriamiento en aire y enfriamiento en agua), la resistencia a compresión ha sufrido una disminución con respecto a la resistencia obtenida a temperatura ambiente, existiendo una notable diferencia entre estos dos últimos casos. En el caso de enfriamiento en aire se produce una reducción en la resistencia de un 10% mientras que con enfriamiento en agua la reducción es del 3%. Se concluye que, en ambos casos, el hecho de someterlos a un cambio brusco de temperatura impide que el vapor de agua que aún no ha salido de los poros quede retenido en ellos de manera que genere una serie de presiones internas que resulten desfavorables en el hormigón. Se podría pensar que en el caso de enfriar la probeta al aire permite que el vapor de agua escape con más facilidad, aunque no daría lugar a que se hidratase la matriz a causa de la velocidad del proceso, mientras que en el caso de enfriamiento en agua, aunque la evacuación del vapor de agua de los poros sea más costosa, el hecho de que la probeta esté sumergida en agua supondrá la rehidratación del cemento, mejorando en cierto modo las propiedades perdidas a causa del aumento de temperatura.

En Ríos et al. [4] se conoce que un incremento de la temperatura provoca un aumento de la porosidad en hormigones de ultra-alta resistencia, especialmente de los microporos, de una manera mucho más drástica que como ocurría en el hormigón sin fibra D0. Aunque a temperatura ambiente la porosimetría de un hormigón con fibras resulta mucho más homogénea que en un hormigón sin fibras, el

efecto que la temperatura tiene a parte de aumentar la porosidad, es provocar una deshomogenización de la distribución de poros incrementando de manera notable la cantidad de microporos [3]. De la misma manera, los poros en los hormigones con fibras presentan una esfericidad más baja que la de los hormigones D0, ya que éstos suelen aparecer bajo las fibras, por lo que a la hora de sufrir los efectos de las presiones internas generadas por el vapor de agua acumulado en los poros supone un inconveniente [4]. Por el contrario, contrarrestando el efecto negativo de las fibras metálicas frente al aumento de temperatura aparecen las fibras de polipropileno. Las fibras de polipropileno se funden a una temperatura de 176 °C aproximadamente, y desaparecen en su totalidad a 460 °C. En este caso, como la temperatura máxima que alcanzan las probetas es de 300 °C, las fibras de polipropileno no llegarán a desaparecer, pero si se fundirán parcialmente y crearán unos canales a través de la matriz por los que el vapor de agua generado en los poros a causa de la temperatura pueda ser evacuado con mayor facilidad [11]. Esto se muestra reflejado en la Figura 6, en la que a simple vista la resistencia a compresión de DSLPP calentada a 300 °C y enfriado al horno apenas varía con respecto a la obtenida a temperatura ambiente, ya que solo se mejora un 0,17 %. De la misma manera que ocurría en el caso de D0, al ser un proceso de enfriado lento, ya que es en el horno, también se producirá una hidratación del cemento, tanto por parte del vapor de agua como por las fibras de polipropileno. Por lo que todas estas causas serán las que permitirán compensar los efectos negativos de la temperatura, además de conseguir mejorar esta propiedad, aunque sea solo un poco.

En el caso del choque térmico la situación cambia con respecto a lo que se observaba en D0. Como muestra la Figura 6, en este caso el choque térmico generado sumergiendo las probetas en agua resulta más desfavorable que

dejándolas enfriar al aire. En el primer caso (enfriamiento en agua), la disminución de la resistencia a compresión ha sido de un 18% con respecto al valor a temperatura ambiente, mientras que en el segundo caso (enfriamiento en aire) de un 9%. Del mismo modo que ocurría en D0 resultará más complicado la evacuación del vapor de agua en el caso de enfriamiento en agua que, en aire, aunque en este caso, además de abandonar la matriz a través de los poros tendrá que hacerlo a través de los canales que proporcionan las fibras de polipropileno fundidas, por lo que será más costoso aún. En este caso, la presión interna tiene una mayor influencia que la hidratación, ya que el número de poros es menor, a consecuencia de la fusión de las fibras de polipropileno que, al ser absorbidas por los poros de los alrededores, reducen en cierto modo el aumento de la porosidad que se produce a causa del aumento de temperatura.

3.2 Módulo de Young

Para el análisis del modulo de Young se realizará una comparación conjunta para D0 y DSLPP. El motivo de esto, es que ya otros autores [4] han evidenciado que el factor que influencia al módulo de Young es la existencia de una importante cantidad de poros del orden de nanómetros, y la reducción de poros que presenta DSLPP en comparación con D0 se sitúa en el rango de los microporos, como se ha indicado previamente. De hecho, se puede observar que los valores del módulo de Young tanto para D0 como para DSLPP son muy parecidos a temperatura ambiente.

No obstante, el daño térmico generado por la presión que ejerce el vapor de agua afecta principalmente a los poros de la escala nanométrica, y por tanto esto se refleja en una disminución significativa del módulo de Young.

En los casos de choque térmico, era de esperar que el daño fuera mayor ya que el vapor queda retenido en estos nanoporos de una manera más significativa, reduciendo el módulo

de Young en ocasiones hasta más del 50% del valor de referencia. Se puede concluir con los datos obtenidos que el daño térmico que ocasiona un impacto térmico en aire es notablemente mayor que el producido en agua. Con esto se puede concluir que en el caso de enfriamiento en agua permite hidratar la matriz de hormigón, evitando la excesiva pérdida de rigidez que supone enfriar las probetas al aire. En las Figuras 7 y 8 se puede apreciar de manera cualitativa el daño que provoca la temperatura en el módulo de Young. Es necesario mencionar que en este ensayo se están comprimiendo las probetas y por tanto los poros, por lo que el daño térmico que pudiera haber ocasionado la temperatura en dichos poros no se pondrá del todo de manifiesto.

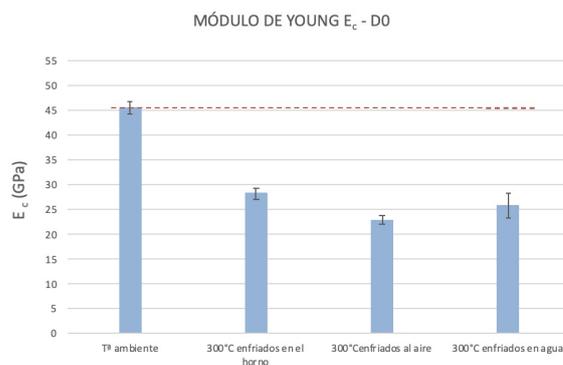


Figura 7. Módulo de Young hormigón D0.

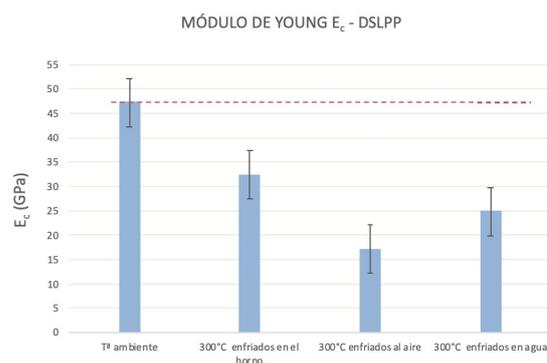


Figura 8. Módulo de Young hormigón DSLPP.

3.3 Energía de fractura y resistencia a flexotracción

En este apartado se muestran y analizan conjuntamente los resultados obtenidos mediante el ensayo de flexión en tres puntos,

como la energía de fractura y la resistencia a flexotracción de los hormigones.

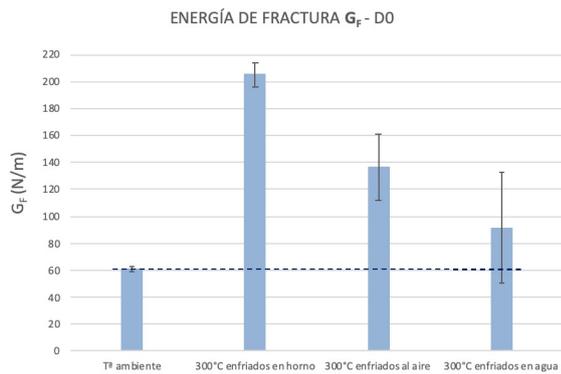


Figura 9. Energía de fractura hormigón D0.

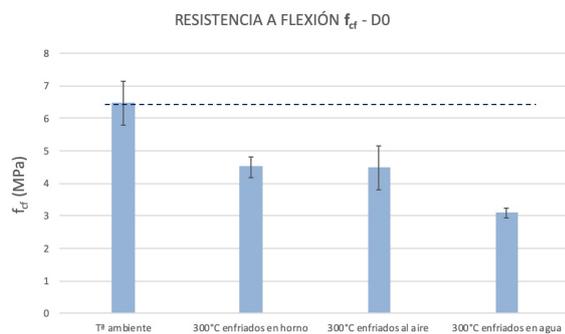


Figura 10. Resistencia a flexotracción hormigón D0.

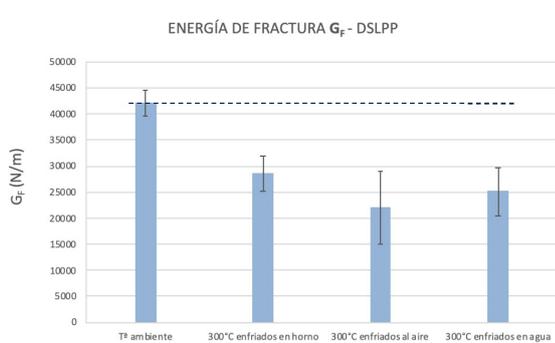


Figura 11. Energía de fractura hormigón DSLPP.

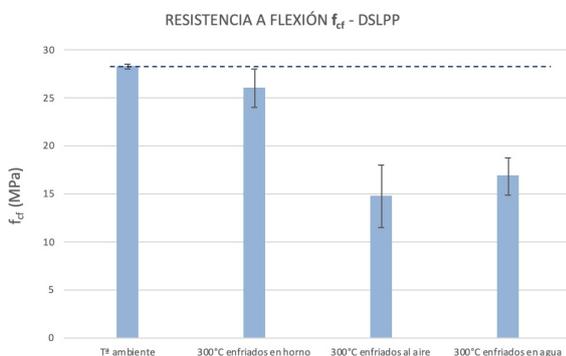


Figura 12. Resistencia a flexotracción hormigón DSLPP.

En el caso D0, se puede observar en la Figura 9 como la energía de fractura experimental aumenta con la temperatura de casi tres veces el valor que se obtiene a temperatura ambiente. Como ocurría en el ensayo de compresión, el aumento de la temperatura genera un aumento de la porosidad, que permite evacuar el vapor de agua generado en un enfriamiento lento, de manera que se produzca una hidratación de la matriz dando lugar a un hormigón más dúctil, y por tanto, aumentando la energía de fractura residual. Esto no es del todo positivo, ya que la resistencia a flexotracción disminuye un 30% (Figura 10), poniendo de manifiesto, que solo se produce una mejora de la energía de fractura gracias a que el área encerrada bajo la curva $P-\delta$ aumenta por un aumento en la cola de la curva.

En los casos de choque térmico que se han ensayado, la energía de fractura sufre una disminución considerable respecto al caso enfriado lentamente en el horno. La resistencia a flexotracción también disminuye, aunque en menor medida. Esto se debe a que el choque térmico no permite una adecuada hidratación del cemento, y por tanto la ductilidad no mejora todo lo que podría hacerlo, dando lugar a una mejora mucho menos significativa en la cola de la curva $P-\delta$. Se podría decir, que esta menor hidratación es la causante de microfisuras a través de las cuales se propaga el daño, disminuyendo la resistencia a flexotracción. Se puede observar como en el caso del choque térmico en agua, el resultado es peor, tanto en la energía de fractura como en la resistencia a flexotracción. Esto refleja, que el daño térmico ocasionado al enfriar la probeta en agua es mayor. Además, uno de los ensayos realizados en agua no pudo completarse, ya que la probeta rompió por un lugar distinto de donde se encontraba la entalla, como consecuencia de la acumulación del daño térmico sobre algún defecto inicial del material. De igual modo, en los hormigones D0 los ensayos realizados tras el choque térmico en agua han resultado ser mucho más dispares, dando lugar a una mayor

desviación. Este ensayo desvela indirectamente como de afectada queda la porosidad tras la temperatura y el impacto térmico.

En el caso del hormigón con fibras, como se puede ver en la Figura 11, un aumento de la temperatura genera una disminución de la energía de fractura a causa de la presión interna generada por el vapor de agua en los poros. El aumento de la porosidad provocado por la temperatura se contrarresta como ya sabemos, en cierto modo por las fibras de polipropileno que, aunque a 300 °C se han fundido y han perdido su efecto de ligadura, son absorbidas por los poros de los alrededores evitando un incremento excesivo de dicha porosidad.

El efecto de la temperatura sobre un hormigón reforzado con fibras de acero genera una disminución en la carga máxima [3], sin que se pueda apreciar una mejora significativa del comportamiento post-pico de la curva. No obstante, este efecto está contrarrestado por las fibras de polipropileno. Aunque el estar sometidas a temperatura también provoca una caída en la carga máxima soportada, si que mejoran el comportamiento plástico de la matriz de hormigón [11].

En ambos casos, tras el choque térmico, la energía de fractura disminuye con respecto a la obtenida si se deja enfriar en horno como era de esperar, no obstante, en el caso del enfriamiento en agua la situación es mejor que en aire por dos motivos: la disminución de resistencia a flexotracción es menor (Figura 12), y el valor final de la flecha que es mayor. Esto quiere decir que el enfriamiento en agua es menos desfavorable. En necesario recalcar, que en este ensayo interviene de manera notable la porosimetría, ya que, a diferencia del ensayo a compresión, este ensayo puede poner de manifiesto el daño térmico ocasionado en los poros, ya que en este caso no se comprimen, sino que se abren, así como la propagación de dicho daño. En el caso de enfriamiento al aire, el vapor de agua encontrará menos dificultades para evacuar la matriz, fomentando su

deshidratación, y por tanto permitiendo el aumento de la porosidad, haciendo al material más frágil y creando una red de microfisuras mayor. Por otro lado, en el caso de estar sumergido en agua, se impedirá de manera más notable que el vapor retenido en los poros escape, y aunque pueda generar mayores presiones permitirá una mayor hidratación del cemento, haciéndolo más dúctil.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos en este trabajo se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. En términos generales el hormigón reforzado con fibras proporciona mejores prestaciones que el hormigón en masa. En términos relativos, el primero resulta mucho más afectado frente a un choque térmico.
2. La resistencia a compresión se ve afectada por el choque térmico, debido a las presiones internas causadas por el vapor de agua que se genera con un aumento de temperatura y que queda retenido en los poros.
3. En el caso del módulo de Young, los nanoporos que aparecen en las matrices de los hormigones D0 y DSLPP a causa de un aumento de temperatura, se ven más afectados por un choque térmico provocado por el aire que por el agua. Es por ello por lo que se deduce que una mayor facilidad para la evacuación del vapor de agua, como es en el aire, genera una deshidratación de la matriz, provocando una menor rigidez.
4. Los hormigones sin fibras disminuyen su valor de energía de fractura tras un choque térmico frente al valor que se obtiene al enfriar en el horno, aunque éstos valores siguen siendo más altos

que los obtenidos a temperatura ambiente. Como ya se sabía, el aumento de energía de fractura solo se atribuye a una mejora de la ductilidad por la hidratación del cemento, por lo que en el caso del choque térmico se pone de manifiesto que la hidratación es mucho menor debido a la rapidez del proceso.

5. Los hormigones con fibras sufren una disminución de la energía de fractura con la temperatura en todos los casos, aunque con el choque térmico es más acusado. La disminución de la energía de fractura en este caso se debe a una reducción en la resistencia a flexotracción principalmente, por lo que se pone de manifiesto que la hidratación de la matriz que aumenta la ductilidad, apenas se produce, en términos relativos, y que el aumento de la porosidad y las presiones internas generados por el vapor de agua que no es evacuado tienen un impacto directo en esta reducción.
6. En el caso de los hormigones con fibras, las fibras de polipropileno fundidas proporcionan una mejora en la evacuación del vapor de agua generado, ayudando también a la hidratación del cemento, esto se ve reflejado en la resistencia a compresión tras un choque térmico en aire. En el caso de la energía de fractura, el choque térmico en agua resulta más favorable ya que, aunque la salida del vapor de agua de la matriz sea más dificultosa, ayuda a evitar la propagación del daño y la aparición de microgrietas y por tanto conseguir una resistencia a flexión mayor.
7. En el caso de los hormigones sin fibras ocurre lo contrario, la acelerada salida del vapor de agua cuando la probeta se somete a un choque térmico en aire

impide en mayor medida la hidratación, por lo que la resistencia a compresión será menor, mientras que en el caso de la energía de fractura el agua impedirá más que el aire la salida del vapor de agua, por lo que las presiones internas en la matriz provocarán un daño mayor en los poros, fomentando la propagación de la grieta, y haciendo que la resistencia a flexotracción sea menor.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación obtenida para la realización de los trabajos, a través del proyecto BIA2016-75431-R concedido por el Ministerio de Economía y Competitividad.

Referencias

- [1] D. Y. Yoo and N. Banthia, "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 267–280, 2016.
- [2] J. D. Ríos, H. Cifuentes, C. Leiva, C. García, and M. D. Alba, "Behavior of high-strength polypropylene fiber-reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. In press, 2018.
- [3] J. D. Ríos, H. Cifuentes, C. Leiva, and S. Seidl, "Analysis of the mechanical and fracture behavior of heated ultra-high-performance fiber-reinforced concrete by X-ray computed tomography," *Cem. Concr. Res.*, vol. 119, pp. 77–88, 2019.
- [4] J. D. Ríos, C. Leiva, M. P. Ariza, S. Seidl, and H. Cifuentes, "Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography," *Mater. Des.*, p. 107582, 2019.
- [5] R. Deeb and B. L. Karihaloo, "Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes," *Mag. Concr. Res.*, vol. 65, no. 9, pp. 546–556, 2013.

- [6] “EN-12390-3: 2009. Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens, AENOR,” Brussels, European Committee for Standardization (CEN), 2009.
- [7] RILEM, “TCM-85: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams,” *Mater. Struct.*, vol. 18, no. 106, pp. 287–290, 1985.
- [8] G. V Guinea, J. Planas, and M. Elices, “Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 1—Influence of experimental procedures,” *Mater. Struct.*, vol. 25, no. 4, pp. 212–218, 1992.
- [9] J. Planas, M. Elices, G. V Guinea, and J. Planas, “Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2 - Influence of bulk energy dissipation,” *Mater. Struct.*, vol. 25, pp. 305–312, 1992.
- [10] M. Elices, G. V Guinea, and J. Planas, “Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 3 - Influence of cutting the P-d tail,” *Mater. Struct.*, vol. 25, pp. 327–334, 1992.
- [11] H. Cifuentes, C. Leiva, F. Medina, and C. Fernández-Pereira, “Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 64, no. 5, pp. 457–470, 2012.