

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

Recibido el 31 de mayo de 2019; aceptado el 17 de diciembre de 2020

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 aire y agua. De esta forma, se analiza la influencia de la velocidad de aplicación de las cargas de enfriamiento sobre sus propiedades mecánicas.

2022 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).

PALABRAS CLAVE: Hormigones de muy alta resistencia; choque térmico; fibras; enfriamiento.

ABSTRACT

This paper analyzes 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 air and water. In this way, the influence of the application speed of cooling loads on their mechanical properties is analyzed.

2022 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. Creative Commons License (CC BY-NC-ND 3.0).

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

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / email: bulte@us.es (Héctor Cifuentes Bulté).

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 térmica, 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 reducir 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. Los autores han analizado el comportamiento de hormigones de muy alta resistencia sometidos a temperaturas de hasta 300°C en trabajos previos [2]–[4], 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.

Es sabido por otros estudios, entre los que cabe destacar los realizados por algunos de los autores [5], [6], 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, aún 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 han analizado las propiedades mecánicas a temperatura ambiente y residuales de los hormigones, incluyendo la energía de fractura, y todo ello para un hormigón reforzado (fibras de acero y polipropileno) y sin reforzar (usado 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 (DSLPP) y, otro sin ningún tipo de refuerzo, como hormigón de control (D0). El diseño de los hormigones se ha realizado de acuerdo con los trabajos de Deeb y Karihaloo [7]. En la [tabla 1](#) se muestra la dosificación y denominación 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 x 100 x 440 mm³, seis probetas cúbicas de 100 x 100 x 100 mm³ y dos probetas cilíndricas de ϕ 100 x 200 mm³ como se puede observar en la [figura 1](#). Todos los moldes presentan las dimensiones normalizadas indicadas en la norma UNE EN 12390-1 [8]. 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 idéntico 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°C/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 [8]. 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 entalla para medir la apertura de grieta.

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 [9] y con las correcciones propuestas por Elices *et al.* [10]–[12].

3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resistencia a compresión

La figura 5 muestra la resistencia a compresión simple de los hormigones D0 y DSLPP, respectivamente, para los distintos procesos de enfriamiento.

Como se puede apreciar en la figura 5, para el caso del hormigón D0, una vez calentado 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 durante el calentamiento puede ser evacuado más

fácilmente del hormigón, a través del mayor número de poros generados como consecuencia del daño térmico [3], reduciendo así presiones internas indeseadas en los poros y promoviendo la hidratación del cemento a su paso [13].

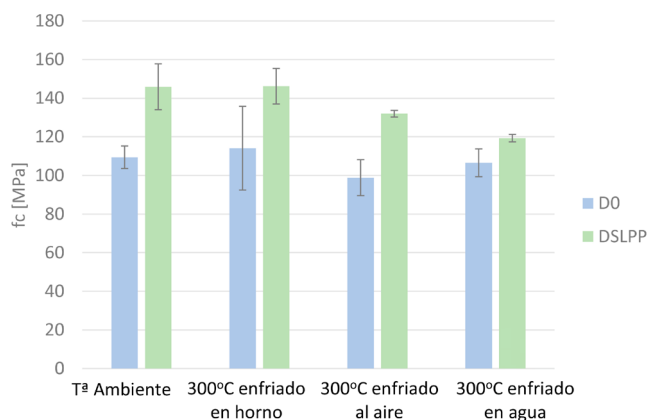


Figura 5. Resistencia a compresión hormigón D0 y DSLPP.

En relación a las dos formas de choque térmico que se han ensayado (enfriamiento en aire y enfriamiento en agua), se puede observar que 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 (enfriamiento en aire y agua). En el caso de enfriamiento en aire, se produce una reducción en la resistencia a compresión 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 favorece a 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 enfriamiento al aire, permite que el vapor de agua escape con más facilidad, en comparación con el de agua, 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 difícil, pues el agua exterior impide su evacuación, el hecho de que la probeta esté sumergida en agua en todo momento, supondrá la rehidratación del cemento, mejorando, en cierto modo, las propiedades perdidas a causa del daño térmico.

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, aparte 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 estos suelen ser propensos a concentrarse 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 incon-

veniente [4], [5]. 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 sí se fundirán parcialmente y crearán unos canales a través de la matriz por los que el vapor de agua generado a causa del proceso de calentamiento pueda ser evacuado con mayor facilidad [13]. Esto se muestra reflejado en la figura 5 para el caso de los hormigones DSLPP, 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%. Por el mismo motivo que ocurría en el caso de D0, al ser un proceso de enfriamiento 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 del daño térmico debido a la temperatura, además de conseguir mejorar esta propiedad, aunque sea solo un poco.

En el caso del choque térmico en DSLPP (enfriamiento en aire y agua), la situación cambia con respecto a lo que se observaba en D0. Como muestra la figura 5, 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 el vapor 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 módulo de Young se realizará una comparación conjunta para D0 y DSLPP (figura 6). El motivo de esto, es que ya otros autores [1] han evidenciado que el factor que influencia significativamente al módulo de Young es la existencia de una importante cantidad de poros de tamaño 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 (ver figura 6).

Para el caso de los hormigones calentados, 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 tiene menos tiempo para ser evacuado y 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 (temperatura ambiente). 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. De manera 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 la [figura 6](#) 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, así como sus poros, por lo que, el daño térmico que pudiera haber ocasionado la temperatura en dichos poros, no se pondrá del todo de manifiesto.

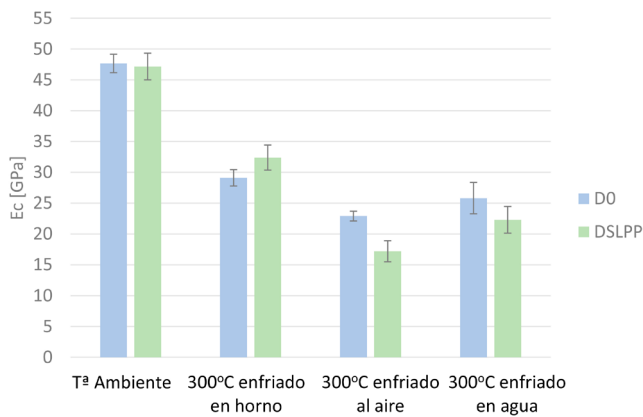


Figura 6. Módulo de Young hormigón D0 y DSLPP.

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. Para el caso de la energía de fractura, los resultados no se han mostrado en conjunto, en una misma figura, debido a que la diferencia de escala de valores tan significativa entre los hormigones D0 y DSLPP haría inapreciable los efectos producidos.

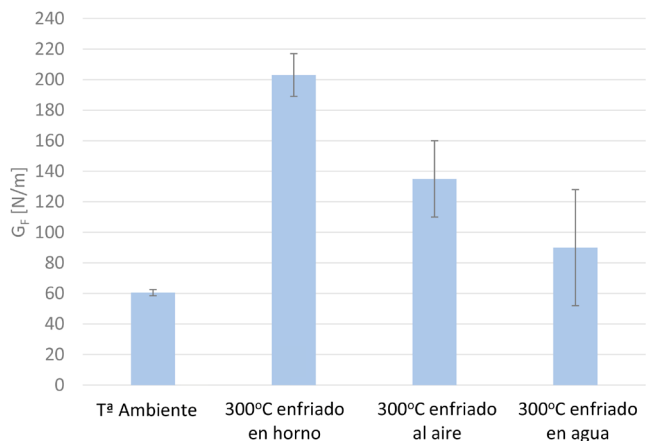


Figura 7. Energía de fractura hormigón D0.

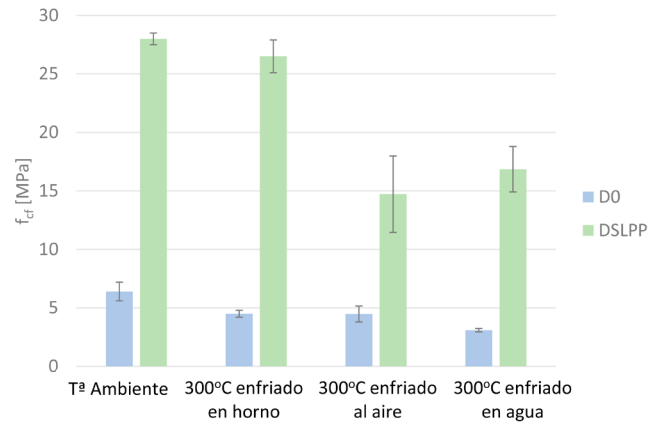


Figura 8. Resistencia a flexotracción hormigón D0 y DSLPP.

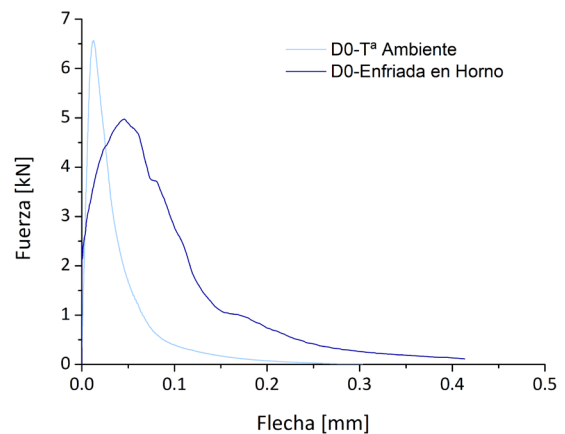


Figura 9. Curva carga-flecha hormigón D0 a Tª Ambiente y enfriado en horno.

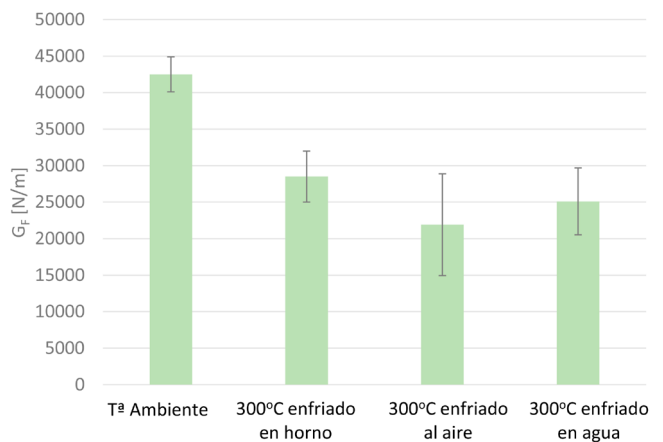


Figura 10. Energía de fractura hormigón DSLPP.

Para el caso del hormigón D0, se puede observar en la [figura 7](#), como la energía de fractura experimenta un aumento 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 cuando se produce un enfriamiento lento (enfriamiento en horno), de manera que, se produzca una hidratación de la matriz dando lugar a un hormigón más dúctil, y por tanto,

umentando la energía de fractura residual. Esto no es del todo positivo, ya que la resistencia a flexotracción disminuye un 30% (figura 8), 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 de la ductilidad del material (figura 6).

En los casos de choque térmico que se han ensayado, la energía de fractura de D0 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 ductilidad del material $P-\delta$, aunque sigue obteniéndose mayor área bajo la curva $P-\delta$, (ver figura 9). 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, DSLPP, como se puede ver en la figura 10, 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, sí que mejoran el comportamiento plástico de la matriz de hormigón [13].

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 8), 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.

4. 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 hay una mayor facilidad para la evacuación del vapor de agua. Sin embargo, el enfriamiento 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 estos 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] Yoo, D.Y. and Banthia, N. (2016) Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review, *Cement and Concrete Composites*, vol. 73, pp. 267–280.
- [2] Ríos, J.D., Cifuentes, H., Leiva, C., García, C. and Alba, M.D. (2018) Behavior of High-Strength Polypropylene Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete Exposed to High Temperatures, *Journal of Materials and Civil Engineering, ASCE*, vol. 30, no. 11, p. 04018271.
- [3] Ríos, J.D., Cifuentes, H., Leiva, C. and Seidl, S. (2019) Analysis of the mechanical and fracture behavior of heated ultra-high-performance fiber-reinforced concrete by X-ray computed tomography, *Cement and Concrete Research*, vol. 119, pp. 77–88.
- [4] Ríos, J.D., Leiva, C., Ariza, M.P., Seidl, S. and Cifuentes, H. (2019) Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography, *Materials & Design*, p. 107582.
- [5] Suescum-Morales, D., Ríos, J.D., Martínez-De La Concha, A., Cifuentes, H., Jiménez, J.R. and Fernández, J.M. (2021) Cement and Concrete Research Effect of moderate temperatures on compressive strength of ultra-high-performance concrete : A microstructural analysis, vol. 140, no. July 2020.
- [6] Ríos, J.D., Cifuentes, H., Leiva, C., Ariza, M.P. and Ortiz, M. (2020) Effect of polypropylene fibers on the fracture behavior of heated ultra-high performance concrete, *International Journal of Fracture*, vol. 223, pp. 173–187.
- [7] Deeb, R. and Karihaloo, B.L. (2013) Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes, *Magazine of Concrete Research*, vol. 65, no. 9, pp. 546–556.
- [8] EN-12390-3: 2009. Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens, AENOR, Brussels, European Committee for Standardization (CEN), 2009.
- [9] RILEM TCM-85, (1985) Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, *Materials and Structures*, vol. 18, no. 4, pp. 287–290.
- [10] Guinea, G.V., Planas, J. and Elices, M. (1992) Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 1- Influence of experimental procedures., *Materials and Structures*, vol. 25, no. 4, pp. 212–218.
- [11] Planas, J., Elices, M. and Guinea, G.V. (1992) Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2-Influence of bulk energy dissipation, *Materials and Structures*, vol. 25, no. 5, pp. 305–312.
- [12] Elices, M., Guinea, G.V. and Planas, J. (1992) Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 3- Influence of cutting the P- δ tail., *Materials and Structures*, vol. 25, no. 6, pp. 327–334.
- [13] Cifuentes, H., Leiva, C., Medina, F. and Fernández-Pereira, C. (2012) Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC, *Magazine of Concrete Research*, vol. 64, no. 5, pp. 457–470.