

## Tiempos de fraguado, consistencia y propiedades mecánicas de hormigón de ultra alta resistencia con fibras (UHPFRC)

E. Giménez-Carbó <sup>(1)</sup>, R. Torres Remón <sup>(1)</sup> y P. Serna Ros <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> ICITECH Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6380>

### RESUMEN

El objetivo del trabajo es el desarrollo de dosificaciones de hormigón de ultra alta resistencia con fibras, que pueda ser utilizado con la técnica de puesta en obra de la proyección. Se analiza una serie de mezclas de UHPFRC con diferente cantidad, tipo de aditivos (plastificantes y acelerantes de fraguado) y diferentes tiempos de mezclado para conseguir hormigones que se puedan colocar en obra proyectados, con tiempos de fraguado ultrarrápido y altas resistencias mecánicas iniciales. Se estudia la trabajabilidad, la consistencia, los tiempos de fraguado y las resistencias mecánicas (flexión y compresión) de las distintas mezclas. Los resultados mostraron dosificaciones con tiempos de inicio de fraguado inferior a 1 minuto y muy buenas propiedades mecánicas a las 24 horas, sin reducir la alta resistencia a compresión a los 28 días. A partir de los resultados obtenidos, se proponen diferentes utilidades de estas mezclas, teniendo en cuenta el nuevo contexto en el campo de la construcción, con la aparición de nuevas técnicas de puesta en obra del hormigón.

**PALABRAS CLAVE:** UHPRC, fraguado, hormigón ultra alta resistencia.

### 1.- INTRODUCCIÓN

La irrupción de los aditivos en la tecnología del hormigón ha propiciado el desarrollo de nuevos materiales, y la posibilidad de conseguir hormigones de ultra alta resistencia con fibras (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC). Este material es producto de tres tecnologías: los hormigones autocompactables, los hormigones con fibras y los hormigones de alta resistencia [1] y se empezó a desarrollar con el objetivo de mejorar tres aspectos importantes; las propiedades mecánicas, la durabilidad y la trabajabilidad del hormigón.

El UHPFRC empezó a desarrollarse en Francia en los años 90 y según la *Association Française de Génie Civil* (AFGC) [2] este material de matriz cementante presenta una resistencia característica a compresión a los 28 días de más de 150 MPa, con elevada resistencia a flexo-tracción y comportamiento dúctil. Por otra parte en los últimos años ha

habido pequeñas variaciones en la puesta en obra del hormigón, desarrollándose los hormigones autocompactables y mejorando las técnicas para la utilización de hormigón proyectado, que en su momento supuso un gran avance [3].

Con todo ello en el presente estudio se van a desarrollar mezclas de UHPFRC que puedan utilizarse con la técnica de la proyección. El desafío que presentan estas dosificaciones es que los hormigones de ultra alta resistencia se fabrican con grandes cantidades de aditivo superplastificante, cuya acción incrementa los tiempos de fraguado. Sin embargo, para utilizar este material proyectado es necesario reducir estos tiempos, lo que obligará a introducir en la mezcla aditivos acelerantes de fraguado. Esta acción puede comprometer las resistencias mecánicas que se consigan con la mezcla [4]. En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos al elaborar diferentes mezclas de hormigón de elevadas resistencias mecánicas, que sean compatibles con la puesta en obra de la proyección. Para ello se estudia la influencia del acelerador de fraguado en la trabajabilidad, la consistencia, los tiempos de fraguado y su efecto sobre la adquisición de resistencias a corto y largo plazo [5].

## **2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL**

En el laboratorio de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València se tiene experiencia en el desarrollo de mezclas para la obtención de UHPFRC [6], [7], [8]. La investigación se inició con la utilización de dos dosificaciones conocidas y probadas de este material a las que se introdujo diversas cantidades de distintos tipos de acelerantes de fraguado. A partir de los resultados obtenidos se diseñaron 4 fases consecutivas de ensayos en los que se analizó la influencia de la variación de dosificación del aditivo acelerador de fraguado sobre su comportamiento a lo largo del tiempo. Esto es en estado fresco, donde se medirá la consistencia y los tiempos de inicio de fraguado de las mezclas, y en estado endurecido dónde se estudiara la variación de las resistencias mecánicas a diferentes edades.

## **3.- MATERIALES, DOSIFICACIÓN Y METODOLOGÍA**

Como ya se ha comentado anteriormente la realización de hormigones de UHPRC implica la selección de excelentes materiales así como una gran exactitud en su dosificación. Para el caso que nos ocupa y tras la revisión de la bibliografía generada por personal de ICITECH [5],[6],[7],[8] se utilizan los siguientes materiales: Cemento CEM I 52.5R, agua procedente de la red de abastecimiento de la UPV, como adición activa se utiliza humo de sílice de dos tipos, ELKEM MICROSILICA 940-D (HSD) un humo de sílice densificado con una densidad entre 500 y 700 kg/m<sup>3</sup> y ELKEM MICROSILICA 940-U (HSSD) un humo de sílice sin densificar con una densidad entre 200 y 3500 kg/m<sup>3</sup>. Como adición inerte que nos permita reducir el contenido en cemento se utilizará filler calizo OMNIA (FC) o harina de cuarzo US-500 SIBELCO HISPANIA (SIKA) (HC) compuesta en más del 90% por sílice cristalina. Se emplean áridos silíceos de diferentes granulometrías y como aditivo superplastificante se ha empleado SIKA VISCOCRETE 225P (SIKA). Las dos dosificaciones de partida aparecen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Dosificaciones utilizadas.

<i>Materiales</i>	<i>Dosificación del hormigón (kg/m<sup>3</sup>)</i>	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>
CEM I 52,5R	500	800
Agua	170	170
Aditivo Superplastificante	4	4
Árido silíceo 0/1.5 mm	770	0
Árido silíceo 0/0.8 mm	0	562
Árido silíceo 0/0.4 mm	630	302
Adición inerte	(FC) 150	(HC) 225
Adición activa	(HSD) 98	(HSSD) 175

En el apartado 4 se especifican los cuatro tipos de acelerantes de fraguado que se han utilizado en la fase preliminar para encontrar el más adecuado para la realización de los experimentos. Por otra parte la secuencia de introducción de componentes en la elaboración del hormigón aparece en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Secuencia de introducción de componentes en la elaboración de hormigones.

<i>Incorporación en la amasadora</i>	<i>Sólidos (sin aditivos)</i>	<i>Agua</i>	<i>Aditivos</i>		<i>Fin de amasado</i>
			<i>Superplastificante</i>	<i>Acelerador Fraguado</i>	
Tiempo de amasado	30 s	30 s	150 s	600s	Variable

#### 4.- ESTUDIO PRELIMINAR

En el estudio preliminar se va a elegir el tipo de acelerador de fraguado que más se adapta a los objetivos del estudio.

**Tabla 3.** Diferentes morteros con diferentes aceleradores de fraguado y tiempo de inicio de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

<i>Mortero</i>	<i>Tipo Acelerador de fraguado</i>	<i>Cantidad de acelerador de fraguado</i>		<i>Tiempo de inicio de fraguado (min)</i>
		<i>Peso (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>% peso CEM</i>	
M1	CONTROL	-	-	+ 90
M2	SIKA SIKASET-3	15	3	25
M3	SIKA SIKASET-3	30	6	7
M4	SIKA SIKASET-3	50	10	7
M5	IQE AKF-63	40	8	-
M6	IQE AKF-63	20	4	-
M7	IQE AKF-63	10	2	2
M8	IQE AKF-63	5	1	6
M9	ISOCRON CEN RAPID-500	20	4	55
M10	ISOCRON CEN RAPID-500	50	10	6
M11	BASF X SEED-130	30	6	22
M12	BASF X SEED-130	50	10	6

Para ello se toma una dosificación de referencia (este caso la dosificación 1) y se estudia para distintas cantidades de aditivo los tiempos de fraguado. Para evaluar el efecto de los distintos aditivos reductores del tiempo de fraguado, y seleccionar el más adecuado, se decide realizar ensayos únicamente sobre una de las dosificaciones de partida. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. Tras el análisis de los resultados obtenidos se observa que las mezclas con las que se obtienen menores tiempos de fraguado con baja cantidad de acelerador de fraguado, son aquellas que emplean el aditivo IQE AKF-63 en porcentajes entre el 1 y 2%.

### 5.- FASE 1 DE ENSAYOS

El objetivo de la fase 1 de ensayos es establecer la cantidad de aditivo acelerador de fraguado seleccionado (IQE AKF-63) y la dosificación óptima de las dos planteadas (la dosificación D1 o D2) para este tipo de hormigón. Las cantidades de acelerante de fraguado con que se van a iniciar los ensayos es del 0,5, 1 y 1,5% sobre el peso de cemento de la mezcla. Las variables estudiadas para llegar a realizar la elección son la evolución de la trabajabilidad de la mezcla así como la evolución de sus resistencias mecánicas a corto y largo plazo.

#### 5.1.- Resultados de consistencia y trabajabilidad

Los resultados sobre la trabajabilidad y consistencia de los morteros se expresan en función del diámetro de la galleta estabilizada tras levantar el cono normalizado descrito en la normativa [9], [10], tras establecer tiempos determinados de levantamiento.

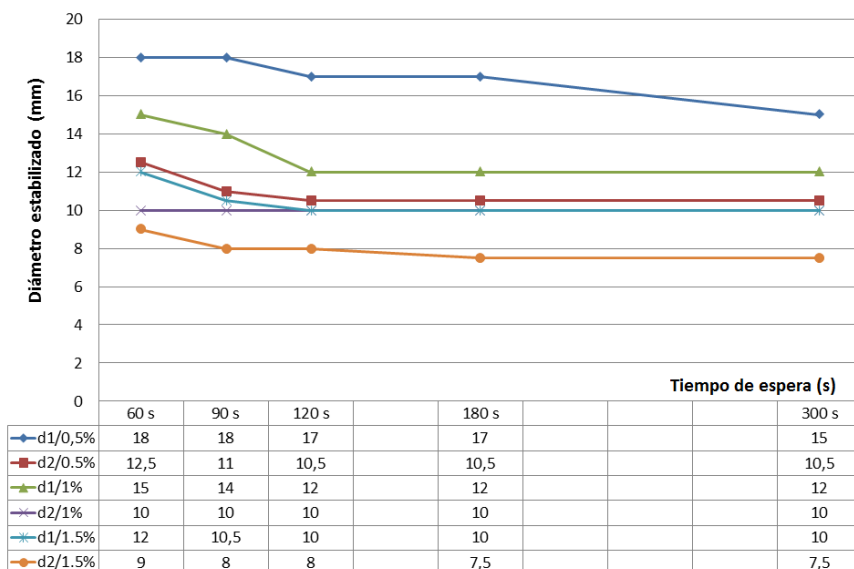


Figura 1. Trabajabilidad de los morteros con diferentes porcentajes de acelerador de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 1. Como se ilustra en él las diferentes curvas marcan la tendencia de los morteros a continuar con el escurrimiento, sin una clara estabilización que muestre el inicio del fraguado en pocos minutos. También se puede apreciar un mayor escurrimiento en los morteros en los que se ha utilizado la dosificación D1, y por supuesto los morteros con menor escurrimiento son los que poseen una mayor cantidad de acelerador de fraguado. Se puede destacar que la evolución de la trabajabilidad no es la esperada, debido a la tendencia de las curvas a seguir disminuyendo con el tiempo. Por ello en la siguiente fase del programa experimental se propone utilizar otro equipo para medir la galleta estabilizada al levantar el cono, ya que se intuye que el equipo utilizado hasta el momento requiere la utilización de un volumen importante de mezcla.

### 5.2.- Resultados de resistencias mecánicas

En la fase experimental 1 también se realizaron ensayos de resistencias mecánicas a corto y largo plazo (3 y 5 horas para corto plazo y 3, 7 y 28 días para largo plazo). Los resultados se presentan en las figuras 2 y 3. Se rompieron un total de 36 probetas normalizadas [11].



**Figura 2.** Resistencia a Flexión de las probetas ensayadas en la fase 1. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras las probetas realizadas con la dosificación de partida D2 siempre presenta mayores valores tanto para la resistencia a flexión como a compresión a cualquier edad. Por este motivo en la fase 2 del programa experimental se realizaron nuevos ensayos pero descartando la dosificación 1.

Las resistencias a corto plazo no son las esperadas, por ser prácticamente inexistentes en los ensayos a compresión para ambas dosificaciones. Sin embargo, las resistencias a largo plazo si son elevadas y suficientes para los objetivos planteados, aumentando con el tiempo y la cantidad de acelerador de fraguado.

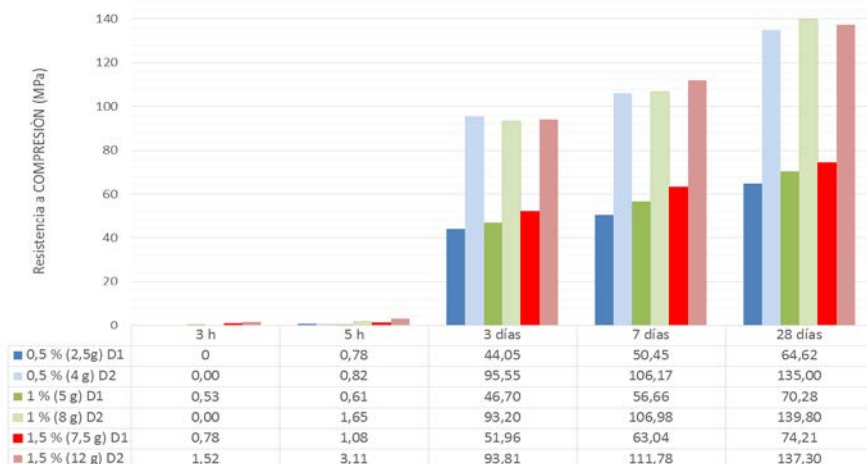


Figura 3. Resistencia a Compresión de las probetas ensayadas en la fase 2. Fuente: Elaboración propia.

## 6.- FASE 2 y FASE 3

En las siguientes fases del programa experimental (fase 2, 3 y 4) sólo se utilizará la dosificación D2. Y con los resultados de la fase anterior, se plantea modificar el equipo para evaluar la trabajabilidad y aumentar la cantidad de acelerador de fraguado.

Además se introducirá el variable tiempo de mezclado del acelerador de fraguado que se mantuvo constante en 1 minutos en la fase 1 y en la fase preliminar. En la fase 3 se establecerá el tiempo de mezclado del acelerador de fraguado en 20 segundos, para evaluar su influencia en la adquisición de resistencias.

### 6.1.- Resultados de consistencia y trabajabilidad

Los resultados sobre la trabajabilidad y consistencia de los morteros se expresan en función del diámetro de la galleta estabilizada tras levantar el tubo de PVC no normalizado, tras establecer los tiempos de levantamiento de cono que se pueden ver en la figura 4.

Como ilustra la figura 4, las diferentes curvas a excepción del mortero control, no muestran tendencia a continuar con el escurrimiento, a partir de 5 minutos para 1'5% de acelerador de fraguado y a partir de 30 segundos para 3% de acelerador de fraguado. En este caso (3% de acelerador de fraguado), el inicio de fraguado es casi instantáneo y se traduce en 1 minuto y 30 segundos desde el vertido del acelerador en la amasadora (debido a que el tiempo de mezclado no se ha modificado aún y es de 1 minuto, como se ha establecido inicialmente).



**Figura 4.** Trabajabilidad de los morteros con diferentes porcentajes de acelerador de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

Por ello, analizando la trabajabilidad y a falta de conocer los resultados obtenidos en cuanto a las resistencias, la mezcla más óptima para los objetivos del proyecto en cuanto a trabajabilidad, es la compuesta por la D2, con el 3% de acelerador de fraguado IQE AFF63.

## 6.2.- Resultados de resistencias mecánicas

En la fase 2 se realizaron un total de 15 mezclas para evaluar las resistencias mecánicas a las edades de 6, 9, 12 y 24 horas y posteriormente a 28 días. Los porcentajes de acelerador de fraguado empleado son 1.5 y 3%. Se romperán un total de 45 probetas a flexión y 90 a compresión con los resultados que se presentan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Diferentes morteros con diferentes aceleradores de fraguado y tiempo de inicio de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

Dosificación base D2				
Mortero	% de acelerador	Edad de ensayo	R. Flexión (MPa)	R. Compresión (MPa)
A1	0% (CONTROL)	6 horas	2.51	1.92
A2		9 horas	1.05	2.20
A3		12 horas	2.76	4.70
A4		24 horas	8.08	51.52
A5		28 días	22.09	125.77
A6	1.5 % (12 gr/l)	6 horas	2.45	2.76
A7		9 horas	3.06	7.37
A8		12 horas	4.98	18.58
A9		24 horas	9.34	63.04
A10	3 % (24 gr/l)	28 días	24.80	137.30
A11		6 horas	3.37	7.49
A12		9 horas	3.98	14.20
A13		12 horas	6.58	28.33
A14		24 horas	9.34	60.84
A115		28 días	22.28	129.14

Tras el análisis de los datos obtenidos se puede decir que se produce un aumento de las resistencias a corta edad, sobre todo en las primeras 12 horas. A las 24 horas las resistencias tanto a flexión como a compresión son similares para los distintos contenidos en acelerador de fraguado (1.5 y 3%). A 28 días, a consecuencia del incremento del acelerador de fraguado los morteros con un 3% de aditivo muestran menores resistencias, aunque esta disminución no es excesiva.

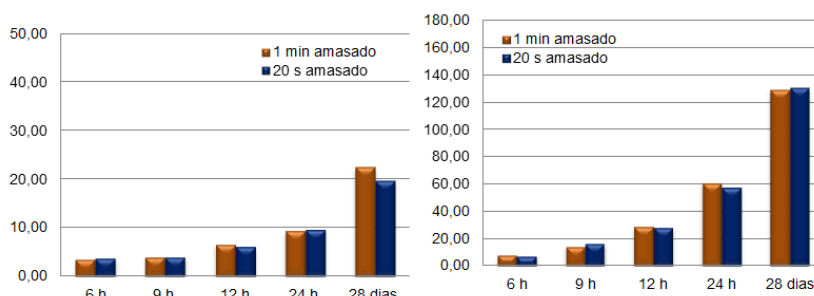
Por ello se puede afirmar que la mezcla realizada que mejor se adapta a los objetivos del trabajo experimental (esto es mezclas que presenten fraguados ultra rápidos con resistencia a edades tempranas con una determinada consistencia y sin escurrimiento) es la mezcla que parte de la dosificación D2, con un porcentaje del 3% sobre el peso del cemento de aditivo IQE AKF-63 (acelerador de fraguado).

### 6.3.- Influencia del tiempo de mezclado del aditivo

En la fase 3, se varió el tiempo de amasado del acelerador de fraguado durante la fabricación de las mezclas. Hasta este momento este tiempo de actuación era de 60 segundos, pero pensando en la técnica de la proyección se quiso verificar la influencia de reducir significativamente este tiempo hasta 20 segundos.

Se realizaron un total de 7 ensayos para evaluar la evolución de la trabajabilidad en los morteros en los que se había dejado actuar al acelerador de fraguado 20 segundos, y se observó que no existía ninguna diferencia respecto a los morteros ensayados con anterioridad. En todos los casos con la dosificación D2 y con el 3% de IQE AKF-63 no se produce escurrimiento, es decir, el inicio del fraguado es instantáneo.

Para evaluar las resistencias mecánicas se fabricaron un total de 5 morteros con un tiempo de mezclado de 20 segundos y los resultados obtenidos se compararon con las mezclas ensayadas anteriormente con 60 segundos de tiempo de mezclado. Estos datos aparecen en la figura 5. Como se puede apreciar no existen diferencias significativas en los resultados y en ambos casos se obtienen resistencias adecuadas. Por ello se puede decir que la variable “tiempo de mezclado” no influye en la trabajabilidad ni en las resistencias de los morteros en el rango estudiado.

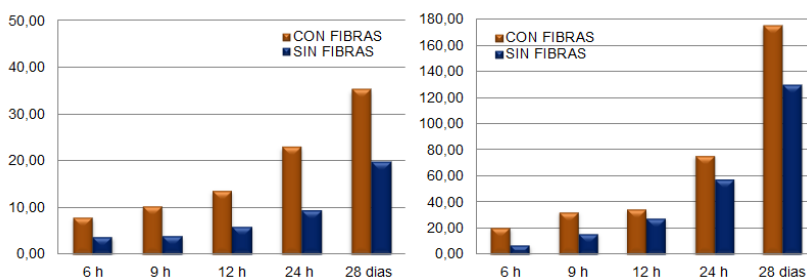


**Figura 5.** Resistencias a flexión y compresión de la fase 3 de ensayos. Fuente: Elaboración propia.



## 7.- FASE 4: INCORPORACIÓN DE FIBRAS METÁLICAS

Una vez seleccionada la dosificación óptima (D2), y la cantidad de acelerador de fraguado adecuada (3%), se pasó a introducir a estas mezclas fibras metálicas de alto límite elástico, longitud de 13 mm y diámetro de 0.20 mm. Con estas nuevas mezclas se fabricaron un total de 3 amasadas de las que se rompieron 15 probetas a flexión y 30 a compresión. Estos resultados se compararon con mezclas fabricadas en la fase anterior y se obtuvieron los resultados mostrados en la fig. 6.



**Figura 6.** Resistencias a flexión y compresión de la fase 4 de ensayos. Fuente: Elaboración propia.

Cómo se observa, las resistencias a flexión y compresión para todas las edades, aumenta al adicionar una cantidad controlada de fibras metálicas (concretamente un 2% del volumen total de la mezcla). Se puede decir que la adición de fibras de estas características influye positivamente en las resistencias a corto y largo plazo, siempre que no se sobrepase la cantidad de fibras, pudiendo provocar dificultades en cuanto a la trabajabilidad de las mezclas. Además la adición de fibras, asegura la conexión o unión de las diferentes capas presentando la posibilidad de emplearse las mezclas desarrolladas para aplicaciones que puedan realizarse con las nuevas técnicas desarrolladas en los últimos tiempos.

## 8.- CONCLUSIONES

El trabajo aquí presentado continúa la investigación de diferentes dosificaciones para conseguir UHPFRC, que tenga las características necesarias para poder utilizarlo con la técnica del hormigón proyectado. Como conclusiones de del programa experimental desarrollado se puede destacar:

- Se ha conseguido la elaboración de morteros con inicio de fraguado ultra rápido, concretamente en un tiempo de 50 segundos desde el vertido del acelerador de fraguado en la mezcla.
- Se ha seleccionado el aditivo acelerador de fraguado y la cantidad óptima para adelantar el tiempo de fraguado de la mezcla sin comprometer el valor de las resistencias a largo plazo.
- La incorporación de fibras (metálicas y de pequeño tamaño) a las mezclas en cantidades controladas y adecuadas (aproximadamente del 2%), ha supuesto un

incremento de las resistencias iniciales y finales, tanto a flexión como a compresión, en todos los tiempos y edades analizados.

- Se ha podido reducir el tiempo de mezclado del aditivo acelerador en la mezcla, sin apreciar variaciones significativas en el material obtenido.

Con todo ello, se considera que la mezcla diseñada podrá utilizarse con la técnica de proyección de hormigón, y quedan pendientes ensayos experimentales que permitan verificar esta hipótesis.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean expresar su agradecimiento a ECSA (Empresa de Construcción Sostenible y Avanzada) y al personal del NNRG, grupo de investigación de ICITECH.

## **REFERENCIAS**

- [1] Serna Ros, P., López Martínez, J.A. and Camacho Torregrosa, E., 'UHPFRC: De los componentes a la estructura', in 'I Simposio Latino Americano sobre Concreto Autoadensavel', Anais do 54º Congresso brasileiro do concreto, Maceio/Alagoas, Octubre, 2012 (54CBC) 59-81.
- [2] AFGC, 'Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes', 2013.
- [3] Yoggi, G.D., 'History of shotcrete', American Concrete Institute (ACI), 2002.
- [4] Galobardes Reyes, I., 'Characterization and control of wet-mix sprayed concrete with accelerators', Tesis doctoral de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [5] Torres Remón, R., 'Diseño de Hormigón para impresión en 3D', Tesina de master de la Universitat Politècnica de Valencia, 2016.
- [6] Camacho E. and Serna P., 'Optimización de dosificaciones de Hormigón Autocompactante de Muy Alto Rendimiento Reforzado con Fibras Híbrido', in '2º Congreso Ibérico sobre HAC', Guimaraes, Julio, 2010.
- [7] Camacho E., Serna P., and López J.A., 'Caracterización de dosificaciones de Hormigón de Muy Alta Resistencia Reforzado con Fibras con diferentes niveles de exigencia mecánica', in 'V Congreso ACHE', Barcelona, Octubre, 2011.
- [8] Fernández Benito, M.I., 'Desarrollo de productos de hormigón de muy alto rendimiento por conformado durante el proceso de fraguado', Tesina de master de la Universitat Politècnica de Valencia, 2015.
- [9] AENOR UNE-EN 196-3, 'Métodos de ensayos para cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad en volumen' Noviembre 2009.
- [10] AENOR UNE-EN 480-2, 'Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación del tiempo de fraguado' Marzo 2007.
- [11] AENOR UNE-EN 196-1, 'Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas' Noviembre 2005.