

Trabajo de Investigación CST/MIH

Desarrollo de productos de hormigón de muy alto rendimiento por conformado durante el proceso de fraguado

Por:
María Isabel Fernández Benito

Marzo 2015

Autor / Author: María Isabel Fernández Benito		Fecha / Date: 06/03/2015	
Título / Title Desarrollo de productos de hormigón de muy altas prestaciones reforzado con fibras por conformado durante el proceso de fraguado			
Directores del trabajo / Supervisores: Pedro Serna Ros		Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 99
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	
Palabras clave / Keywords: UHPFRC, moldes flexibles, conformado del hormigón			
Código Unesco: 3305/05 Ciencias tecnológicas / Tecnología de la construcción / Tecnología del Hormigón			

Agradecimientos

Mis sinceros agradecimientos a todo el equipo de trabajo de la línea de investigación de UHPC de la Universidad Politécnica de Valencia, con los que he podido aprender y compartir buenos momentos.

En primer lugar a mi tutor, Pedro Serna, con el que he aprendido de cada momento compartido durante el trabajo, a Juan Ángel López, que me ha ayudado en todo lo que he necesitado y me ha enseñado mucho. A los técnicos del laboratorio por su paciencia. A Marta Roig, por su profesionalidad y dedicación. A todos los alumnos de clase de máster con los que compartí muchas horas y que me ayudaron en los inicios duros de esta aventura, sobre todo a Adriana, Gabriel y Marta Iris que me soportaron en los momentos difíciles.

A mis amigos, en especial a Dennis, que siempre me anima a seguir adelante, a David, que me empujó hasta aquí, a mi padre, hermanos, sobrinos y demás familia que me apoyaron desde el principio y sin los que nunca hubiera llegado hasta aquí, y por supuesto, a mi madre, que estaría muy orgullosa de mí.

Muchas gracias a todos.

Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Justificación.....	1
1.2.	Objetivo general.....	5
1.3.	Estructura del documento.....	6
2.	Estado del arte.....	7
2.1.	Hormigón de muy altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC).....	7
2.2.	Proceso de fraguado del cemento Portland.....	10
2.2.1.	Hidratación del cemento Portland.....	11
2.2.2.	Factores que influyen en el tiempo de fraguado.....	15
2.3.	Normativa para determinación de tiempos de fraguado en hormigones y conglomerantes.....	21
2.3.1.	Norma UNE-EN 196-3:2005+A1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.....	21
2.3.2.	Norma UNE-EN 480-2. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación del tiempo de fraguado.....	22
2.3.3.	Norma UNE 83601:2013. Tiempo de fraguado en hormigón proyectado.....	23
2.3.4.	Norma ASTM C403. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.....	23
2.3.5.	NTG 41017 h 12. Norma Técnica Guatemalteca. Determinación del tiempo de mezclas de concreto por su resistencia a la penetración.....	24
2.3.6.	Norma IRAM 1662. Determinación de tiempos de fraguado para hormigones y morteros de cementos Portland.....	24
2.3.7.	Norma UNE-EN 13279-2 sobre ensayo de fraguado en yesos.....	25
2.4.	Técnicas de fabricación de piezas de hormigón curvas.....	26

2.4.1.	Encofrados.....	26
2.4.2.	Hormigón proyectado.....	29
2.4.3.	Conformado con moldes flexibles.....	30
2.5.	Procedimiento de conformado del hormigón.....	30
2.5.1.	Molde.....	31
2.5.2.	Hormigón.....	37
2.5.3.	Sanación autógena.....	42
2.6.	Otras aplicaciones fuera del hormigón.....	43
2.6.1.	Fabricación de tejas de arcilla.....	43
2.6.2.	Prensado de chapa para fabricación de piezas de automóvil.....	44
3.	Programa experimental.....	45
3.1.	Metodología utilizada.....	45
3.2.	Materiales.....	48
3.2.1.	Hormigón.....	48
3.2.2.	Moldes y encofrados.....	54
3.3.	Primera fase de ensayo.....	56
3.3.1.	Definición de dosificación de trabajo.....	56
3.3.2.	Determinación del tiempo de conformado.....	57
3.3.3.	Resistencias en probetas.....	60
3.4.	Segunda fase de ensayo.....	62
3.4.1.	Fabricación de placas.....	62
3.4.2.	Resistencias en placas.....	67
4.	Resultados.....	69
4.1.	Primera fase de ensayos.....	69
4.1.1.	Tiempos de conformado.....	69
4.1.2.	Resistencias a flexo-tracción en probetas.....	72
4.1.3.	Resistencias a compresión simple en probetas.....	76
4.2.	Segunda fase de ensayos.....	79
4.2.1.	Fabricación de placas.....	79
4.2.2.	Resistencias en placas.....	81
5.	Conclusiones.....	85
6.	Futuras líneas de investigación.....	87
	Referencias.....	89

1. Introducción.

1.1. Justificación.

La arquitectura aplicada en las últimas décadas ha llevado a conceptos de estética basados en la construcción con nuevos materiales, nuevas formas y diseños estructurales únicos en muchos casos.

El desarrollo de aplicaciones informáticas de cálculo de estructuras que consiguen dibujar espacios en 2D y 3D con líneas curvas y volúmenes esféricos, permite el diseño de estructuras únicas y complejas.

El problema se plantea cuando se quieren transformar los diseños informáticos en obras reales, con curvaturas especiales, diferentes en una u otra parte de la misma pieza y geometrías que obligan a fabricar un encofrado específico para su hormigonado y que en la mayoría de los casos no va a poder ser reutilizado. Por este motivo no pueden emplearse más que en proyectos de alto perfil.

Un ejemplo de este tipo de construcción lo tenemos en el Centro Cultural de Heydar Aliyev en Baku, Azerbaijan, diseñado por la arquitecta Zaha Hadid (Fig. 1), en el que no se utilizó ni una sola línea recta en los más de 13.000 paneles que conforman la fachada [1].



Fig. 1. Centro Cultural de Heydar Aliyev, Baku (Azerbaijan)



Fig. 2. Double-curved cladding elements: Heydar Aliyev Cultural Centre (Baku, Azerbaijan)

Dada la variedad de formas y tamaños de las piezas fabricadas, su construcción necesita una gran cantidad de moldes diferentes, con lo que los costes en encofrados encarecen demasiado la obra final, siendo además muy difícil su reutilización dado que las formas son tan exclusivas.

El sistema de fabricación mediante moldes flexibles hubiera permitido fabricar todas las piezas usando un mismo encofrado o un escaso número de ellos, para aumentar la productividad, con lo que los costes podrían haber disminuido en gran proporción, además de que hubiera existido la posibilidad de reutilización de encofrados para otras obras de diferentes diseños, lo que supone mayor reducción aun en los costes.

Otro ejemplo significativo son los edificios del Nuevo Zollhof en Düsseldorf, Alemania (fig. 3 y 4), del arquitecto Frank Gehry, en el que un conjunto de tres edificios presentan fachadas onduladas, construidas con placas curvas [2]. Para cada uno de los elementos construidos se fabricó un molde diferente utilizando espuma de poliestireno, método de fabricación largo y costoso, pero que aún sigue utilizándose.



Fig. 3. Der Neue Zollhof, Düsseldorf (Alemania)



Fig. 4. Elementos prefabricados Der Neue Zollhof, Düsseldorf (Alemania)

Para esta construcción los moldes eran de grandes tamaños y formas muy variadas por lo que la posibilidad de reutilización es escasa.

En este caso, volvemos a comprobar que los costes de los encofrados reducen la aplicación de estos diseños curvos a los edificios de muy altos presupuestos, por lo que se ve necesaria la búsqueda de soluciones que abaraten los costes constructivos.

La cubierta del Parque Oceanográfico Universal de Valencia, del arquitecto Félix Candela fue construida con una lámina de hormigón con fibras de acero de 6 cm de espesor y con una luz de 40 metros (fig. 5).

Para su fabricación se utilizó un encofrado construido con láminas de madera colocadas sobre una cimbra que le iba dando la forma alabeada y donde se sujetan las láminas de madera, donde posteriormente se coloca el hormigón proyectado (fig. 6) [3].



Fig. 5. Construcción de la cubierta del parque del oceanográfico (Valencia) [4]

Este sistema constructivo a base de encofrado de madera y hormigón con fibras proyectado, supone una fabricación costosa, pues el montaje del apoyo metálico y la colocación de la madera es complejo y necesita mucha mano de obra y un tiempo elevado de ejecución, además de no poder ser reutilizable, suponiendo unos costes totales muy altos que no son accesibles para muchos tipos de construcciones.

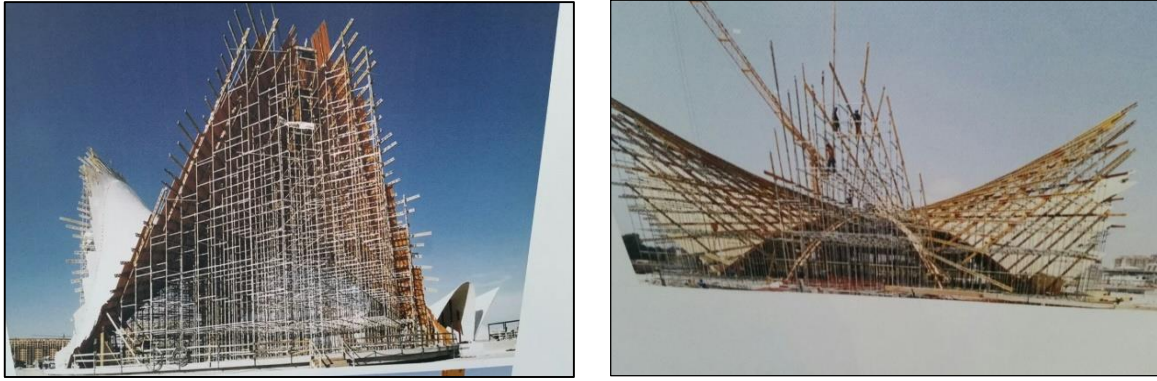


Fig. 6. Detalles del encofrado utilizado en la fabricación de la cubierta del parque del oceanográfico (Valencia)

La utilización de encofrados flexibles hubiera facilitado el proceso constructivo, sin usar una estructura de cimbra tan compleja y se hubiera podido utilizar UHPFRC sin necesidad de proyectar el hormigón, obteniéndose acabados superficiales más lisos.

El paseo marítimo de la Playa Poniente de Benidorm (Alicante), fue diseñado por los arquitectos Carlos Ferrater y Xavier Martí Gali, con formas onduladas simulando las olas del mar entrando en la playa (fig. 7).



Fig. 7. Vista general del Paseo Marítimo Playa Poniente, Benidorm (Alicante)

Para su construcción se realizó un muro de hormigón blanco proyectado, curvilíneo, que se fabricó utilizando un encofrado de madera que necesitó ser rigidizado con mallazo, vigas de

reparto transversales y apuntalamiento, para evitar posibles movimientos durante la proyección y hasta el endurecimiento del hormigón (fig. 8 y 9).

Como hemos visto también en la ejecución de la cubierta del parque del oceanográfico de Valencia, la cantidad de material utilizado en el encofrado, la mano de obra necesaria para su fabricación y el tiempo empleado, encarecen el precio final de la construcción.



Fig. 8. Encofrado, Paseo marítimo de Playa de Poniente, Benidorm (Alicante)



Fig. 9. Detalle de encofrado, Paseo marítimo de Playa de Poniente, Benidorm (Alicante)

La ejecución con piezas prefabricadas y moldes flexibles, hubiera mejorado los acabados superficiales, se hubiera reducido el coste en material y mano de obra, además de reducirse los tiempos de ejecución traduciéndose todo esto en disminución de costes totales.

1.2. Objetivo general.

El objetivo principal que se persigue es la fabricación de piezas de hormigones de muy altas prestaciones, de poco espesor y curvadas, que son las que demandan los diseños arquitectónicos actuales y que son los que se cuestionan en cuanto a los encofrados, ya que una pieza más o menos geométrica, además de no presentar mayores problemas a la hora de realizar su encofrado, también presenta más posibilidades de poder ser reutilizada para diferentes estructuras, cosa que no ocurre cuando los diseños son difíciles en cuanto a formas.

En el presente trabajo se intenta dar a conocer nuevas alternativas de construcción de formas alabeadas, con hormigones de altas prestaciones, en moldes deformables, para fabricar piezas de diferentes formas libres arquitectónicas de hormigón, reutilizando un mismo encofrado, reduciendo de esta manera los altos costes que suponen en este tipo de fabricación de piezas

singulares los encofrados especiales que sólo pueden ser utilizados una vez, dadas las características únicas, en muchos casos, de las formas a fabricar.

Con este trabajo se investiga el comportamiento del hormigón de muy altas prestaciones al colocarlo en moldes flexibles y realizar su doblado una vez haya iniciado su fraguado y antes de la finalización de éste.

Se trata de conocer cómo afecta el proceso de conformado, con curvatura simple, en placas de poco espesor de hormigón de muy altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC). Para ello se analiza el intervalo de tiempo adecuado para la realización del conformado y si éste afecta a las características finales de resistencia y acabados de las piezas así fabricadas.

1.3. Estructura del documento.

Este trabajo se divide en 7 capítulos. El primero es el presente capítulo, en el que se expone la justificación, el objeto general y la estructura del documento.

En el capítulo 2 se realiza una pequeña introducción sobre las características de los hormigones de muy altas prestaciones reforzados con fibras, el proceso de fraguado del hormigón y normativa aplicada a determinación de tiempos de fraguado en hormigones y conglomerantes. A continuación se ha recopilado información sobre los sistemas constructivos utilizados comúnmente en la fabricación de formas curvas de hormigón y de los estudios realizados hasta la fecha sobre el sistema de fabricación de piezas mediante el proceso de conformado.

En el capítulo 3 se explica el programa experimental, la metodología de ensayo definida y los materiales utilizados y características del plan de ensayos.

En el capítulo 4 se describen los resultados obtenidos en el programa de ensayos desarrollado.

En el capítulo 5 se exponen las conclusiones a las que se ha llegado a partir de los resultados obtenidos.

Por último, en el capítulo 6 se enumeran una serie de posibles líneas de investigación.

2. Estado del arte.

2.1. Hormigón de muy altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC).

De acuerdo a la primera definición dada en las Recomendaciones provisionales francesas publicadas en 2002 [5], UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete), o simplemente UHPC (Hormigón de Ultra Altas Prestaciones), se consideran los materiales con matriz cementante y resistencia característica a compresión a los 28 días de más de 150 MPa (no se detalla el tamaño del prisma), posiblemente pueda llegar hasta 250 MPa; que contiene fibras de acero con el fin de lograr un comportamiento dúctil bajo tensión y si es posible, para prescindir de la necesidad de refuerzo con armadura pasiva. También contiene una alta cantidad de cemento y agregado de selección especial.

El hormigón de ultra-altas prestaciones (UHPC) es un material pétreo de construcción de muy altas prestaciones cuyo desarrollo comenzó en Francia durante la década de los 90' [6]. Sin embargo, se ha necesitado de un largo proceso de difusión y estudio hasta que, tras dos décadas, la comunidad científica ha dado cuenta de las grandes ventajas de este material: mejora de la sostenibilidad global, desarrollo de productos con un elevado valor añadido, aumento de la seguridad de las infraestructuras [7].

Su alta densidad, muy superior a la de cualquier otro tipo de hormigón (2320-2760 kg/m³) y sus elevadas resistencias a compresión, similares a las del acero, hacen de este material un serio competidor del acero en el que se plantean nuevas posibilidades de construcción.

La elevada durabilidad del UHPFRC, junto con la reducción de la cantidad total de materiales, la utilización de residuos industriales y la reducción de los costes de mantenimiento, provocan un aumento de la vida útil de las infraestructuras y la reducción de los impactos de éstas sobre el medio ambiente.

El UHPFRC, es un producto resultante de combinar las tres tecnologías más punteras utilizadas en el hormigón: alta resistencia, autocompactabilidad y empleo de fibras. Su proceso de elaboración requiere materias primas exclusivas tales como: fibras de alto límite elástico, aditivos de tercera generación, áridos con tamaño máximo reducido...; maquinaria y procesos no convencionales: alta energía de fabricación, curado al vapor...; y elevados niveles de control: agua, humedad, garantía de mantenimiento de espesores en elementos muy finos, proceso de vertido, orientación de fibras, no existencia de juntas frías... [8].

La incorporación de fibras metálicas en el UHPFRC proporciona un aumento en la ductilidad, reduciendo su fragilidad y controlando el desarrollo de su fisuración. Si están uniformemente distribuidas y en suficiente cantidad evitan que las microfisuras se unan, dificultan la propagación de las microfisuras, con lo que disminuye el ancho de fisura, lo cual es muy favorable para la durabilidad y la reducción de la permeabilidad del hormigón.

La resistencia a tracción del hormigón es un mecanismo conjunto entre la matriz y las fibras que atraviesan las fisuras, de acuerdo a la adherencia que exista entre ellas y que va a depender de varios factores [9]: la adhesión física y/o química entre ambas, la resistencia friccional, el componente mecánico asociado con la geometría de la fibra y la trabazón (interlock) de las fibras entre sí. Los valores de resistencia a tracción pueden superar los 10 MPa, dependiendo del tipo y contenido de fibras.

El porcentaje en volumen utilizado de fibras y su esbeltez son parámetros que determinan el comportamiento a tracción del material además de su comportamiento en estado fresco [8].

El factor de efectividad de fibra se define como:

$$k = \frac{V_f \times l_f}{d_f}$$

Donde: k es el factor de efectividad, V_f el % en volumen de fibra, l_f la longitud de fibra y d_f el diámetro de fibra.

En la figura 10 se muestra el factor de efectividad de fibra frente a la resistencia equivalente a flexión [10].

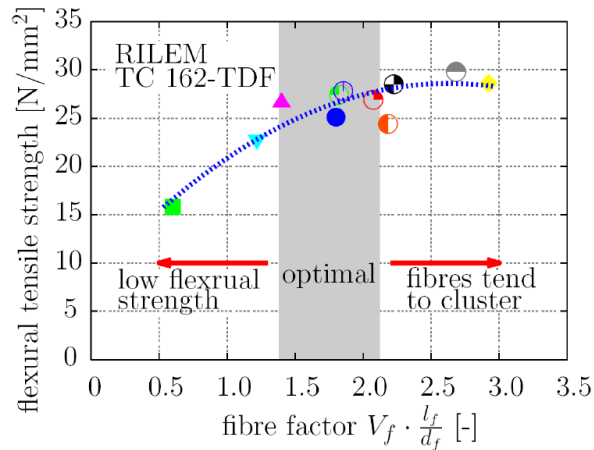


Fig. 10. Factor de fibra frente a resistencia equivalente a flexión para UHPC sin árido grueso

El factor de efectividad óptimo para el UHPC sin árido grueso se encuentra entre 1.5 y 2.25. Valores más bajos ofrecen una baja resistencia a flexión, mientras que valores más altos pueden complicar el proceso de amasado y propiedades del UHPC en estado fresco, tendiéndose a generar erizos de fibras.

Los valores de resistencia a flexión varían entre 30 y 50 MPa, dependiendo de la longitud de fibra.

Si tomamos como ejemplo una viga sometida a flexión, podemos diferenciar tres subzonas en la zona de fisura (fig. 11) [11]:

- Zona de trabazón de agregados, donde existe microfisuración de la matriz por inicio de la abertura de fisura.
- Zona de puenteo de la fisura, las fibras están parcialmente desprendidas.
- Zona de tracción libre, donde las fibras se encuentran totalmente desprendidas de la matriz.

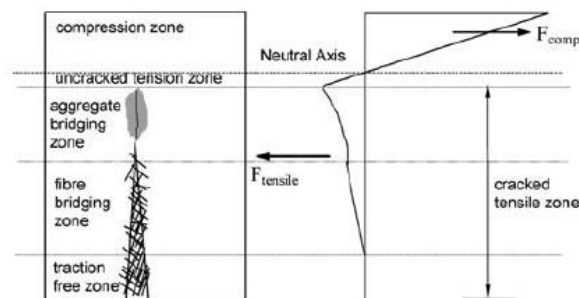


Fig. 11. Figura x. Estado tensional en la zona de fisura.

La contribución de las fibras en la tenacidad depende de las características, cantidad, distribución y orientación con respecto a las máximas tensiones de tracción de las fibras dentro del hormigón.

Por lo general, el fallo de la fibra se produce por desprendimiento de la matriz y no por su rotura, por lo que, cuanto mayor longitud tenga la fibra mayor capacidad resistente.

La utilización de hormigones con refuerzos de fibras para el proceso de conformado mejora las condiciones del proceso, ya que al proporcionar mayor ductilidad la posible microfisuración que podría existir debida al proceso de doblado, es asumida por las fibras.

Si a esto añadimos la propiedad de autosanación que poseen los hormigones y en mayor proporción aquellos en los que existe gran cantidad de cemento y muy baja relación agua/cemento, como el caso de los UHPFRC, estamos ante condiciones favorables para experimentar sobre nuevas técnicas de fabricación de hormigón mediante su conformado.

Las aplicaciones del UHPFRC en la construcción son muy amplias, tanto por motivos de aumento de resistencias, ductilidad, aumento de durabilidad, disminución de secciones y como consecuencia disminución de volúmenes necesarios de material, como por motivos de estética, ya que al conseguirse piezas de mayor esbeltez se obtienen elementos más atractivos, en contraposición con la robustez que caracteriza a las construcciones de hormigón convencional, además de que el UHPFRC al estar compuesto por materiales de gran finura consigue acabados superficiales que son capaces de imitar con extremada fidelidad las superficies de los encofrados, por lo que esto le añade un mayor valor artístico.

En esta línea se deben plantear nuevas alternativas en los procesos de fabricación con este tipo de hormigón, para conseguir la mayor rentabilidad al material, tanto por la capacidad de producción de piezas de diseños únicos, como por la reducción en tiempos de desmoldado e incluso por la posibilidad de movimiento durante el tiempo de fraguado, sin perder prestaciones, posibilitando la fabricación de piezas de diferentes formas utilizando un único molde al que se le da movimiento, con la consiguiente reducción en costes de encofrados y en el precio final de las piezas.

2.2. Proceso de fraguado del cemento Portland.

El tiempo de fraguado es un periodo en el cual se producen reacciones químicas entre los componentes del cemento y el agua, que conducen a un proceso mediante diferentes velocidades de reacción, que generan calor y dan origen a nuevos compuestos; estos provocan que la pasta de cemento endurezca y aglutine al agregado de la mezcla de hormigón, adquiriendo de este modo una cierta resistencia [12].

Según Locher et al. [13], tan pronto como el agua y el cemento se mezclan, los componentes del cemento empiezan a disolverse y unos minutos más tarde la solución se satura de hidróxido cálcico y los silicatos alcalinos pasan a esta.

En el tiempo de fraguado podemos diferenciar dos estados: inicial y final. Estos momentos de inicio y fin de fraguado son definidos de acuerdo a métodos de medida normalizados que sirven para fijar criterios unificados.

El fraguado es causado por la selectiva reacción de hidratación de los componentes del clínker del cemento.

El clínker de cemento Portland contiene 4 compuestos químicos mayoritarios, que son:

- C_3S = silicato tricálcico.
- C_2S = silicato dicálcico.
- C_3A = aluminato tricálcico y
- C_4AF = ferrita aluminato.

2.2.1. Hidratación del cemento Portland.

La hidratación del cemento consiste en una colección de procesos químicos acoplados, cada uno de los cuales se produce a una velocidad que está determinada tanto por la naturaleza del proceso como por el estado del sistema en ese instante.

Para entender cómo se produce la hidratación del cemento es necesario estudiar cada uno de los procesos químicos independientemente, pero teniendo en cuenta que no es esta la forma en la que se desarrollan, sino que están interactuando unos y otros a la vez, condicionando de esta forma los productos resultantes.

Los productos de la hidratación del cemento son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxidos de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados.

Sin la presencia de yeso en el cemento, el proceso de fraguado del C_3A al hidratarse causaría un fraguado muy rápido, ya que su reacción con el agua es casi inmediata. La adición de yeso retarda la hidratación y la aparición del fraguado.

Cuando las proporciones de yeso en el cemento son adecuadas, la estructura de la pasta de cemento está formada principalmente por silicato cálcico hidratado, que es el compuesto que proporciona las resistencias tempranas al hormigón y que se desarrollan hasta los 28 días de edad.

La hidratación de los silicatos del cemento, tanto el C_3S como el C_2S , va a formar los mismos productos, variando solamente en la cantidad de producto formado y en el calor de hidratación liberado en las reacciones.

El producto principal que se forma en la hidratación de los silicatos es un hidrato de silicato cálcico, CSH, que es una materia cristalina, geliforme. La secuencia de reacción de los silicatos se puede seguir más fácilmente tomando como referencia la curva calorimétrica de la figura 12, que nos muestra la velocidad de evolución de calor en función del tiempo [14].

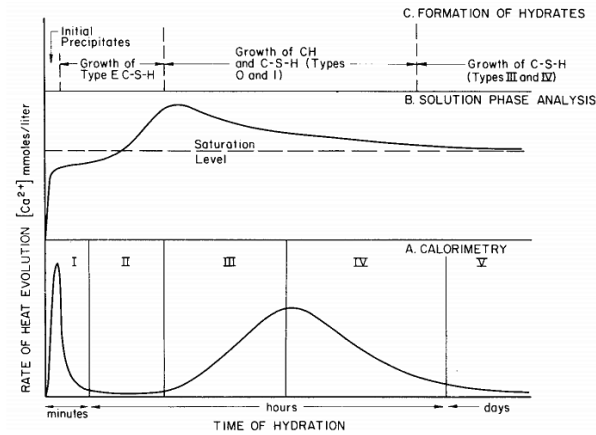


Fig. 12. Representación esquemática de los cambios que tienen lugar en el proceso de hidratación de los silicatos del cemento

En el proceso de hidratación de los silicatos del cemento podemos distinguir 5 etapas:

- *Etapas 1. Periodo inicial o preinducción.*

Cuando los silicatos del cemento entran en contacto con el agua de amasado comienza un período donde hay una rápida evolución de calor.

Los silicatos se disuelven superficialmente (Fig. 13) suministrando iones silicato, $H^2SiO_4^{-2}$, e iones $(OH)^{-}$ e iones Ca^{2+} , que pasan a la solución elevando su PH rápidamente hasta valores cercanos a 13 debido a la gran aportación de iones $(OH)^{-}$ a la solución.

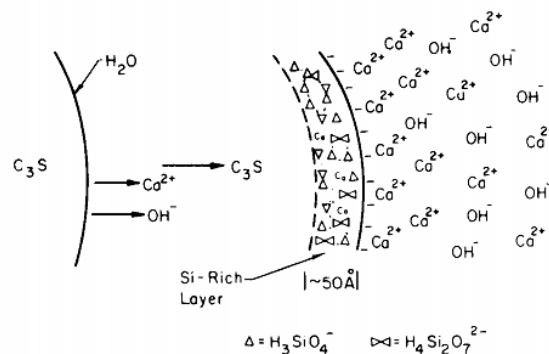


Fig. 13. Figura x. Proceso de disolución de silicatos.

Al cabo de unos pocos segundos, la solución se sobresatura con respecto al silicato de calcio hidratado, que precipita rápidamente.

La forma cementera de este producto es C-S-H. La precipitación de este producto disminuye de nuevo la concentración de iones Ca^+ y $(\text{OH})^-$ en la solución, lo que favorece que continúe de nuevo la disolución de los silicatos.

▪ *Etapa 2. Período de inducción o durmiente.*

El período de inducción está causado por la necesidad de obtener una cierta concentración de iones en la solución antes de que se formen núcleos de cristales que faciliten el crecimiento del producto de hidratación. Es un periodo de inactividad relativa en el que la cantidad de hidratos formados es muy pequeña, lo que explicaría por qué el hormigón con cemento Portland se encuentra en estado plástico y es fácilmente trabajable.

▪ *Etapa 3. Fraguado.*

Una vez finalizado el período de inducción comienza el fraguado inicial, en el que los silicatos empiezan a hidratarse de nuevo. La velocidad de hidratación alcanza su máximo en el momento del fraguado final, donde se alcanza el máximo calor de hidratación y empieza el proceso de endurecimiento inicial.

Durante el fraguado hay que distinguir entre la fase de “principio de fraguado” y la de “fin de fraguado” y que son importantes para conocer el tiempo durante el cual la pasta de cemento permanece plástica y por tanto, trabajable.

El principio de fraguado se caracteriza por iniciarse la rigidez de la pasta y el final del mismo viene marcado por la pérdida de plasticidad.

El principio y fin de fraguado se pueden determinar mediante diferentes tipos de ensayos como medidas de consistencia, desarrollo de calor de hidratación, transmisión de ultrasonidos, resistividad eléctrica, etc.

El proceso de fraguado está asociado a reacciones químicas con desprendimiento de calor, de esta forma, se puede observar un aumento de temperatura inicial, seguido de un fuerte descenso, que se produciría en el momento en el que se inicia el fraguado y posteriormente un leve ascenso que llegaría a un pico máximo que se considera equivale al punto de fin de fraguado [15] (Fig. 14).

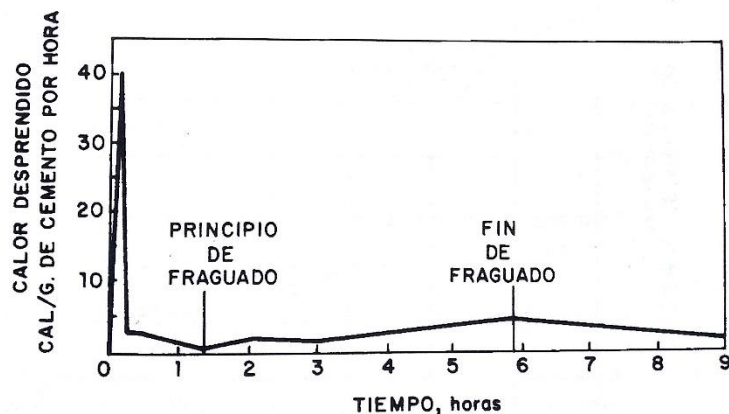


Fig. 14. Figura x. Determinación del fraguado del cemento por calorimetría [15].

El tiempo de fraguado final indica que el endurecimiento ha progresado lo suficiente como para que la mezcla haya alcanzado un mínimo de resistencia medible.

De acuerdo con la norma UNE-EN 197-1:2011 [16], el tiempo de principio de fraguado, en minutos, para los cementos de clase resistente: 32,5; 42,5 y 52,5 es respectivamente: ≥ 75 ; ≥ 60 y ≥ 45 min, no fijándose el tiempo de final de fraguado.

- *Etapa 4. Período de deceleración.*

Debido a la hidratación de silicatos, el espesor de la capa de C-S-H crece. Por consiguiente, llega un momento en que la velocidad de reacción es igual a la velocidad de difusión. A partir de este momento, mientras el espesor de la capa sigue creciendo, el movimiento a través de la capa C-S-H determina la velocidad de la reacción y la hidratación queda controlada por la velocidad de difusión dentro de la capa. La velocidad de reacción empieza a disminuir hasta que llegue un estado estable (etapa 5) después de 12 a 24 horas.

- *Etapa 5. Período de difusión estacionario.*

La velocidad de hidratación es muy baja y está controlada solamente por la velocidad de difusión. Las reacciones controladas por difusión son generalmente bastante lentas, la velocidad disminuye según aumenta el espesor de la capa de CSH y sigue disminuyendo hasta que no haya más silicatos a hidratar.

2.2.2. Factores que influyen en el tiempo de fraguado.

Hay que tener en cuenta que el tiempo de fraguado del cemento no tiene por qué coincidir con el tiempo de fraguado del hormigón que fabriquemos con él, ya que existen varios factores que van a influir en el proceso.

Teniendo en cuenta todas las reacciones químicas que deben producirse para que se dé el proceso de fraguado, tenemos que analizar los factores que van a condicionar que esos procesos se produzcan de una forma u otra:

2.2.2.1. Climatología.

Se ha observado que el tiempo de fraguado disminuye cuando aumenta la temperatura por encima de los 30° C, mientras que también se produce el proceso inverso, es decir, a bajas temperaturas se produce el retardo del fraguado. La hidratación parará cuando la temperatura esté cerca de 0° C.

La exposición a la luz del sol y las condiciones de viento también influyen en el tiempo de fraguado, especialmente en la superficie, en gran parte debido a los efectos de calor y de la evaporación de agua.

2.2.2.2. Relación agua/conglomerante.

A partir de una cantidad de agua mínima necesaria para la hidratación de los compuestos de cemento, a menor relación a/b, menor será el tiempo de fraguado; cuanto menor sea el agua incluida en la mezcla antes iniciará el fraguado del cemento.

2.2.2.3. Contenido de cemento.

Como hemos visto, en el proceso de fraguado influye principalmente el proceso de hidratación de los silicatos del cemento. Por lo tanto, a mayor cantidad de cemento mayor cantidad de silicatos estarán disponibles para reaccionar con el agua, hidratarse y formar silicatos hidratados y menor será el tiempo de fraguado.

2.2.2.4. Composición del cemento.

Los cementos más utilizados están formados por Clínter Portland, regulador de fraguado y en su caso adiciones.

La composición química del cemento afecta directamente al tiempo de fraguado. Cuanta mayor proporción de Clinker exista en el cemento, más cantidad de silicatos habrá disponibles para la hidratación y más rápido se producirá el fraguado. Por lo tanto, los cementos tipo I tienen procesos de fraguado más rápidos que los cementos tipo II.

Entre los minerales presentes en el cemento Portland está el aluminato tricálcico. Cuando se pone en contacto con el agua, la reacción que se produce puede provocar un fraguado rápido de la pasta del cemento debido a la formación de hidratos de aluminato, que son productos no estables y pueden pasar fácilmente de su forma hexagonal a su forma cúbica, produciendo un aumento de porosidad y rotura de la microestructura de la pasta de cemento, lo que provoca un descenso en las resistencias.

El yeso (sulfato cálcico), permite la regulación de la hidratación del aluminato tricálcico, ya que en presencia de iones sulfato, la hidratación del aluminato cálcico va a formar etringita (trisulfoaluminato de calcio), bien cristalizada y estable mientras existan iones sulfato disponibles y que va a provocar un retardo en el fraguado.

Cuando los iones sulfato son consumidos totalmente, la etringita se disuelve liberando iones sulfato que reaccionan con el aluminato que queda disuelto en el agua y forma monosulfato, producto final de la hidratación del cemento.

Por lo tanto, el yeso en el cemento es un retardador del fraguado, siempre que se encuentre en proporciones inferiores a las de aluminato tricálcico, ya que un exceso de sulfatos en el cemento podría evitar el proceso de fraguado.

Los cementos resistentes a los sulfatos tienen en su composición una menor cantidad de aluminato tricálcico, que es el responsable del inicio de la hidratación del cemento al entrar en contacto con el agua, ya que posee una mayor velocidad de hidratación. Por este motivo, los cementos resistentes a los sulfatos y por lo tanto con baja proporción de aluminato tricálcico, poseen tiempos de fraguado superiores a los cementos normales, pues al tener muy baja proporción de aluminatos, la hidratación del cemento es más lenta, además de producir menor calor de hidratación y menor retracción.

Cuando utilizamos UHPFRC, como las cantidades de cemento utilizadas son muy elevadas, el hecho de usar cementos resistentes a los sulfatos van a conseguir frenar el inicio de fraguado que provoca el uso de tales cantidades de cemento.

La finura del cemento también influye en el tiempo de fraguado, ya que cuanto más finas sean las partículas de cemento, mayor superficie específica existirá en contacto con el agua, por lo que la velocidad de hidratación será mayor y menor el tiempo de fraguado.

Por todo esto, los cementos Portland tipo I, sin adiciones, son los que presentan menores tiempos de fraguado, mientras que los demás cementos Portland, al presentar una mayor o menor cantidad de adiciones tendrán tiempos de fraguado mayores, dependiendo del tipo y cantidad de adición en cada caso.

2.2.2.5. Adiciones.

Para producir hormigones más sostenibles, cada vez más se están incluyendo adiciones a los componentes del cemento, a menudo originadas como subproductos de otros procesos industriales.

Por lo general, los materiales sustitutivos del cemento suelen retrasar los tiempos de fraguado porque su hidratación es más lenta, pero dependerá de la naturaleza química de la adición a utilizar y de su proporción de sustitución en el cemento.

Además de las adiciones que puedan existir en el cemento, también podemos tener adiciones a los componentes del hormigón, aportando diferentes beneficios tecnológicos, dependiendo de su origen, estructura, composición química y mineralógica, como puzolanas naturales, cenizas volantes, humo de sílice o microsílíce, escorias de alto horno, etc.

Existen varios tipos de adiciones que pueden entrar a formar parte en los compuestos del hormigón y que podríamos dividir en dos grupos:

Adiciones activas: aquellas que poseen una cierta actividad puzolánica, entre las que se incluyen puzolanas naturales, el humo de sílice, cenizas volantes, escorias de altos hornos, etc.

Adiciones inertes: aquellas cuya función principal es la de relleno de huecos, donde se considera que no existe ninguna reacción química entre ellas y los componentes del cemento, se consideran como filler y pueden diferenciarse varios tipos en función de su naturaleza, composición química, finura, dureza, etc.

En los UHPFRC se utiliza como adiciones del hormigón el humo de sílice y la harina de cuarzo, por lo que el resto quedan fuera del objeto de este estudio.

▪ *Humo de sílice.*

El humo de sílice es un subproducto pulverulento esferoidal procedente de la fabricación en hornos eléctricos del silicio y del ferrosilicio a partir de cuarzo, caliza y hierro. El polvo se recoge en filtros electrostáticos y está formado por partículas esféricas de una gran finura, compuesto en un porcentaje de 82 a 96% por SiO_2 amorfa [15].

Como adición al hormigón cumple dos funciones, ya que debido a su gran finura, actúa como plastificante y debido a su actividad puzolánica reacciona con el hidróxido cálcico procedente de los compuestos activos del cemento, por lo que produce un aumento de las resistencias mecánicas. Debido a su pequeño tamaño puede entrar entre las partículas de cemento, reduciendo la interfase entre pasta y agregado, mejorando así la cohesión de las mezclas.

En estado fresco el uso de humo de sílice reduce la trabajabilidad, por lo que produce una mayor demanda de agua en las mezclas. Es un producto imprescindible en los hormigones UPHC, ya que aporta resistencias y alta durabilidad. Al aportar silicatos al material cementicio, la proporción

de aluminatos es menor y el fraguado dependerá de los silicatos, que tienen un tiempo de hidratación mayor, por lo que la presencia del humo de sílice produce un retardo en el inicio de fraguado.

El humo de sílice se puede utilizar en varios estados: condensado, no condensado y en suspensión; dependiendo de esto tendrá mayor o menor eficacia.

Dado su elevado coste, debe de emplearse la cantidad suficiente para que reaccione con la portlandita o cal liberada en la hidratación del cemento, entre el 20-30 % [17] del peso de cemento, pero sin que esté en exceso, ya que la parte de humo de sílice que no puede formar silicatos sólo sirve como “filler”.

- *Harina de cuarzo.*

La utilización de harina de cuarzo (SiO_2 cristalino) permite reducir el volumen de cemento y completar la curva granulométrica en los tamaños más pequeños por su finura.

Tiene la misma composición química que la arena silíceo pero con tamaño de grano intermedio entre el del cemento y la arena, por lo que su adición completa la curva granulométrica de la pasta aportando mayor compacidad, estabilidad y durabilidad a los hormigones.

Aunque posee cierta actividad puzolánica esta sólo se produce cuando la temperatura es superior a los 150°C , por lo que se puede considerar que su función es la de efecto filler, de relleno de huecos y aumento de compacidad del hormigón. Por este motivo demanda mayor cantidad de agua o de superplastificantes y producen retardo en el fraguado.

2.2.2.6. Aditivos químicos.

Existen gran cantidad de aditivos químicos que se pueden incorporar en la fabricación de hormigones y cada uno de ellos con distintas propiedades e influencia en los tiempos de fraguado. De esta forma podemos incorporar aditivos retardantes o acelerantes del fraguado que nos van a variar los tiempos de inicio y fin del mismo.

Hay que tener en cuenta que los hormigones actuales, para mejorar sus características durables y otras propiedades tienden a requerir menores cantidades de agua de las necesarias para obtener una buena trabajabilidad, por lo que se hace necesario incorporar a la mezcla aditivos plastificantes o superplastificantes que mejoran la trabajabilidad del hormigón sin necesidad de incorporar grandes cantidades de agua. Estos aditivos tienden a retrasar los tiempos de inicio y fin de fraguado.

En cuanto al objeto de este trabajo, los aditivos que nos interesan son los que afectan a los tiempos de fraguado, de última generación, que son capaces de reducir la relación a/b, disminuir la

porosidad y permeabilidad, aumentar la fluidez, densidad y resistencias mecánicas, mejorando la durabilidad del hormigón y produciendo mejores acabados superficiales.

En nuestro caso nos centraremos en los superplastificantes y aceleradores de fraguado, ya que el resto no van a ser utilizados.

- *Superplastificantes.*

Los aditivos superplastificantes se utilizan con la finalidad de aumentar la trabajabilidad del hormigón en relaciones de a/b dadas, reducir la relación a/b manteniendo la trabajabilidad u obtener ambas cosas a la vez.

Son aditivos reductores de agua y están formulados con materiales que permiten una adición a las mezclas de hormigón mucho mayor que los aditivos reductores de agua normales (hasta 10 veces) sin que aparezcan efectos indeseables tales como oclusiones de aire o retardos de fraguado excesivos.

La gran trabajabilidad que proporcionan con relaciones agua/conglomerante bajas hace que se consigan hormigones de muy altas resistencias.

La composición química básica de los aditivos superfluidificantes puede ser lignosulfato puro o sales de formaldehído.

Normalmente es usado como único componente sales formaldehído-melamina sulfonato, ya que este componente no ocluye aire en el hormigón, como ocurre cuando la composición del aditivo está basada en lignosulfonatos, ni tampoco produce un retardo excesivo en el fraguado [18].

- *Aceleradores de fraguado.*

Los aditivos aceleradores de fraguado favorecen la disolución de los componentes anhidros del cemento, con lo que las reacciones de hidratación se producen con mayor rapidez, lo que provoca menores tiempos de fraguado, obteniéndose también resistencias iniciales altas y una gran liberación de calor en las primeras horas.

En gran parte de los aditivos aceleradores se encuentra el cloruro cálcico, que es el acelerante por excelencia, que aunque no se acaba de definir bien su acción, se sabe que actúa como catalizador en las reacciones de hidratación del aluminato tricálcico. Con el cloruro cálcico el tiempo de iniciación de fraguado puede reducirse a menos de la mitad del normal, además mejora la docilidad de los hormigones y aumenta su compacidad, no alterando sus resistencias finales. Este tipo de aditivo tiene el inconveniente de crear eflorescencias y corrosión en las armaduras, especialmente en ambiente húmedo, por lo que no puede ser utilizado en hormigones armados o tesados.

El cloruro sódico tiene un comportamiento similar al del cloruro cálcico aunque su calor de hidratación es más moderado.

En relación a la presencia de cloruros totales en el hormigón, la Instrucción española limita el porcentaje máximo de ion cloro a 0,2 por 100 en hormigón pretensado y a 0,4 por 100 para los hormigones armados.

Otros acelerantes utilizados son el carbonato de sodio, la sosa, o la potasa, pero que pueden producir problemas de retracción o de pérdidas de resistencias mecánicas.

Los aditivos aceleradores basados en aluminatos, poseen gran eficacia y no poseen efectos secundarios, excepto en los casos en los que el hormigón vaya a estar en contacto con suelos ricos en sulfatos.

Existen además aceleradores compuestos por silicatos, fluosilicatos, bases alcalinas, ácido oxálico, alunita, dietanolamina, trietanolamina, etc.

En el gráfico de la figura 15 [15], podemos observar cómo las resistencias a compresión de los hormigones evolucionan en el tiempo de diferente manera según el uso de aceleradores o retardadores de fraguado con respecto a un hormigón en el que no se usa ninguno de ellos.

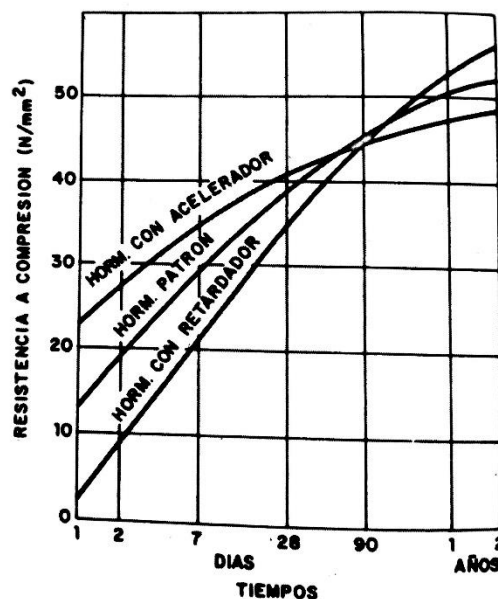


Fig. 15. Efecto de los modificadores de fraguado y endurecimiento sobre las resistencias a compresión de un hormigón

Las resistencias tempranas, a pocos días, son menores que el patrón en hormigones que llevan aditivos retardadores de fraguado, mientras que los que llevan aceleradores de fraguado tienen resistencias más elevadas a estas edades.

En cuanto a tiempos elevados, mayores a 90 días, el comportamiento se invierte, es decir, las resistencias de hormigones con retardadores de fraguado son superiores a las de control, mientras que los que llevan aceleradores de fraguado tienen resistencias inferiores a este [15].

2.3. Normativa para determinación de tiempos de fraguado en hormigones y conglomerantes.

Salvo en algunos productos específicos como las placas alveolares, el hormigón no es un material pensado tradicionalmente para ser moldeado sin encofrado y suele utilizarse el concepto de inicio y fin de fraguado para evaluar el tiempo en que la pasta adquiere una cierta consistencia y es capaz de mantener la forma por sí mismo. Esta propiedad no ha sido estandarizada para el caso de los UHPFRC. Parece lógico que el concepto sea utilizado como referente para la valoración del periodo de conformado del hormigón.

Para determinar los tiempos de conformado se analizan normas aplicadas a diferentes materiales que definen los tiempos de fraguado para definir ensayos apropiados para comprobar de forma sencilla el momento en el que el hormigón comienza a presentar suficiente resistencia para que no fluya en posición curvada.

2.3.1. Norma UNE-EN 196-3:2005+A1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.

Normativa europea aplicable a ensayos de cementos comunes y a aquellos en cuya norma se haga referencia a este método [19].

El tiempo de fraguado se determina observando la penetración de una aguja en una pasta de cemento de consistencia normal, hasta que alcanza un valor especificado.

Se utiliza el aparato de Vicat (fig. 59), que consiste en una aguja con unas dimensiones y peso determinado y un soporte en el que se fija, de tal forma que pueda dejarse caer desde una altura fijada, sobre un molde en el que se ha depositado la pasta de cemento para hacer medidas de la penetración de la aguja en la mezcla.

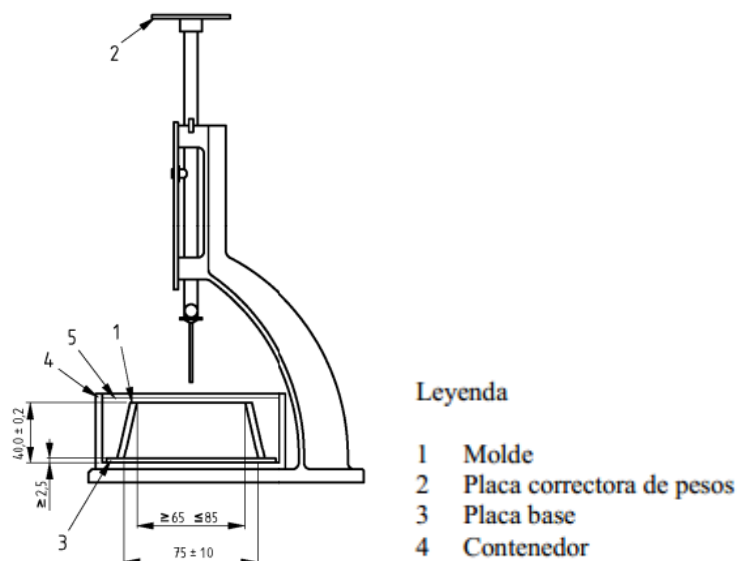


Fig. 16. Vista lateral del aparato de Vicat

El tiempo de inicio de fraguado será aquel transcurrido desde el instante cero hasta el momento en el que la distancia entre la aguja y la placa base sea de 6 ± 3 mm.

Una vez finalizado el ensayo de inicio de fraguado se invierte el molde con la pasta de cemento y comienza el ensayo de fin de fraguado. Este será determinado por el tiempo transcurrido entre el tiempo cero hasta el momento en el que la aguja penetra solamente 0,5 mm.

2.3.2. Norma UNE-EN 480-2. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación del tiempo de fraguado.

Es una adaptación de la UNE-EN 196-3, descrita en el apartado anterior, el procedimiento de ensayo es el mismo [20], pero varía el valor de referencia de penetración de la aguja de Vicat, tanto para la determinación del tiempo de inicio de fraguado como la del fin de fraguado.

En este caso el inicio de fraguado es definido como el tiempo transcurrido desde que se terminó el amasado y el momento en el que la distancia entre la aguja y la placa base es de 4,0 mm. La norma no especifica si permite un grado de tolerancia en este valor, como sí lo hacía en el caso de la norma para los cementos.

Lo mismo ocurre con el final del fraguado, que en este caso es definido como el tiempo transcurrido entre el final del amasado y el momento en el que la aguja no penetra más de 2,5 mm en la probeta.

2.3.3. Norma UNE 83601:2013. Tiempo de fraguado en hormigón proyectado.

En esta norma [21] se define el tiempo de inicio de fraguado como el tiempo transcurrido desde el momento de salida del hormigón por la boquilla de proyección hasta el momento en el que se alcanza una resistencia a la penetración de 3,5 N/mm².

El tiempo de final de fraguado es el transcurrido desde el momento de salida por la boquilla de la masa de proyección hasta el momento en el que se alcanza una resistencia a la penetración de 28 N/mm².

Las medidas de resistencia a la penetración se miden con un aparato con resorte graduado o con un dispositivo hidráulico normalizado para este fin.

La resistencia a la penetración se calcula como la fuerza necesaria para lograr una penetración de 25 mm, dividida por el área de contacto de la aguja, expresándose el resultado en N/mm².

Este ensayo basado en normativa americana ASTM no es aplicable en nuestro caso ya que las resistencias iniciales en los UHPFRC no son comparables con las de los hormigones convencionales.

2.3.4. Norma ASTM C403. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.

Norma estadounidense para determinación de tiempos de fraguado por medidas de penetración en mortero obtenido por tamizado de hormigón [22].

Para este ensayo es necesario tamizar por tamiz de 4,75 mm la fracción de mortero de una muestra representativa de hormigón recién mezclado.

El mortero se coloca en un recipiente y se almacena a una temperatura ambiente especificada. Se aplica una fuerza gradual y uniforme desde un aparato de carga calibrado en el que se acopla una aguja, de tal forma, que colocada ésta en la superficie del mortero, se emplea la fuerza hacia abajo hasta que la aguja penetra en el mortero a una profundidad de 25 ± 2 mm.

Se mide la resistencia a la penetración a intervalos y se hace una gráfica de la resistencia a la penetración en función del tiempo transcurrido.

Los tiempos de fraguado inicial y final son calculados como los tiempos a los cuales la resistencia a la penetración es de 3.5 MPa (500 lb/ pulg²) y 27.6 MPa (4000 lb/ pulg²), respectivamente (fig. 60).

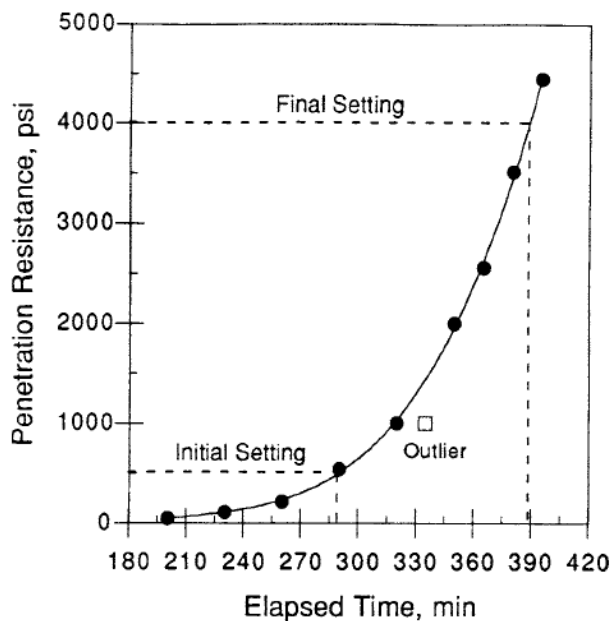


Fig. 17. Imagen de norma ASTM C403 para cálculo de tiempos de fraguado.

Esta norma estadounidense es aplicable en hormigones convencionales o morteros, que no es nuestro caso.

Por otra parte, las resistencias conseguidas en hormigones normales en edades tempranas no son comparables a las que se consiguen con los UHPFRC, por lo que estos valores de resistencias utilizados por esta norma no pueden servir para nuestro caso.

2.3.5. NTG 41017 h 12. Norma Técnica Guatemalteca. Determinación del tiempo de mezclas de concreto por su resistencia a la penetración.

Esta norma [23] es una traducción exacta de la norma estadounidense ASTM C403 descrita anteriormente, por lo que, después de revisada, llegamos a las mismas conclusiones que en caso anterior.

2.3.6. Norma IRAM 1662. Determinación de tiempos de fraguado para hormigones y morteros de cementos Portland.

Norma argentina para determinación de los tiempos de fraguado en hormigones normales. Aunque no se ha podido consultar la norma original sí se han encontrado referencias a ella y su procedimiento en trabajos de investigación [12].

Se utiliza como aparato de ensayo el penetrómetro, que está constituido por un dispositivo de reacción que permitirá la aplicación de una fuerza de hasta 500 N en el que se acoplan las agujas en su parte inferior.

El procedimiento determina el inicio de fraguado como el tiempo transcurrido a partir del contacto inicial entre el cemento y el agua de mezclado, hasta alcanzar una resistencia a penetración con aguja de 3.4 MPa (35 kgf / cm²).

El tiempo de fraguado final será el transcurrido desde el contacto inicial entre el cemento y el agua de mezclado, hasta alcanzar una resistencia de 27.4 MPa (280 kgf/ cm²) (fig. 61).

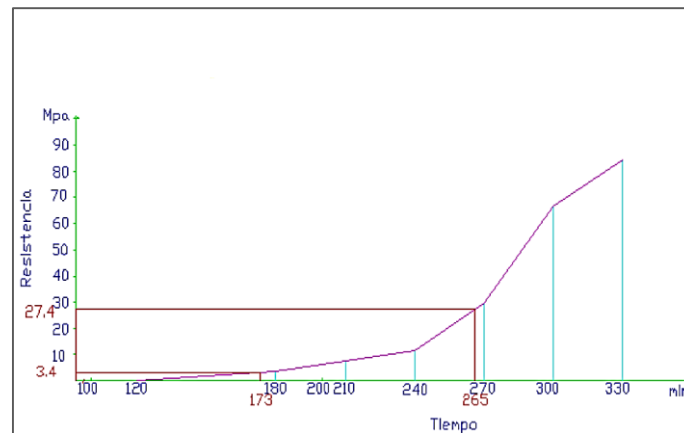


Fig. 18. Ejemplo de cálculo de tiempos de fraguado con la norma IRAM 1662 [12].

El procedimiento es similar a los descritos en las normas ASTM C403 y NTG 41017 h 12, excepto en que las resistencias utilizadas como referencia para definir los tiempos de inicio y fin de fraguado cambian de 3,5 MPa y 27,6 MPa en los casos de las normas ASTM C403 y NTG 41017 h 12 a 3,4 y MPa y 27,4 MPa en la IRAM 1662.

2.3.7. Norma UNE-EN 13279-2 sobre ensayo de fraguado en yesos.

Este ensayo [24] define el inicio de fraguado como el tiempo, en minutos, en que los bordes de una hendidura producida por la hoja de un cuchillo sobre la pasta de yeso dejan de acercarse.

Este criterio de inicio de fraguado ha servido de referencia para la definición del ensayo de determinación del tiempo de conformado.

En esta norma no se determina el tiempo de fin de fraguado.

2.4. Técnicas de fabricación de piezas de hormigón curvas.

La manera tradicional de conseguir dar forma al hormigón es utilizando encofrados de chapa o madera, a una o doble cara, con la forma deseada, donde se vierte el hormigón y una vez endurecido y desmoldado este mantendrá la forma que tuviera el encofrado.

Cuando se pretenden conseguir formas especiales, como el caso de las curvilíneas, el sistema constructivo debe ser más cuidado y en algunos casos el sistema tradicional no es aplicable porque los materiales de los moldes no se adaptan a las formas que se pretenden conseguir o el coste de materiales a emplear es elevado.

Por estos motivos se plantean diferentes técnicas, dependiendo del sistema de encofrado y del hormigón a emplear.

2.4.1. Encofrados.

Podemos fabricar encofrados con las formas deseadas, dependiendo del objetivo que se pretenda conseguir, de tal forma que al verter el hormigón dentro del molde y una vez endurecido y desmoldado, mantenga la forma.

2.4.1.1. Molde de espuma CNC fresado.

A partir de un bloque de espuma, generalmente de poliestireno expandido o extruido, (EPS / XPS) se corta una forma determinada según el tipo de pieza que se quiera fabricar. Posteriormente se cubre con poliurea o una resina sintética más dura, de tal forma que una vez endurecido y pulido obtenemos un molde a una cara que puede ser reutilizado varias veces (fig. 16).



Fig. 19. Detalle de fabricación de molde con espuma CNC fresada.

El inconveniente de estos moldes es el coste económico y el tiempo de fabricación que conlleva cuando quiere ser utilizado en construcciones de gran cantidad de piezas con formas únicas, que obliga a fabricar un número elevado de moldes diferentes.

2.4.1.2. Molde de espuma CNC cortada con hilo.

El procedimiento es similar al anterior, obteniéndose de nuevo moldes a una cara, pero en este caso, el sistema para dar forma al bloque de espuma es utilizando un alambre caliente (fig. 17).



Fig. 20. Imagen de cortador de espuma con alambre.

Con este sistema de cortado se pueden conseguir superficies curvilíneas, pero la libertad de movimientos es reducida, por lo que las formas que se consiguen son más limitadas, a la vez de ser escasa la posibilidad de reutilización.

2.4.1.3. Molde de madera.

Pueden ser utilizados en algunos diseños los moldes de madera a una o dos caras para crear superficies curvas dentro de las cuales se vierte el hormigón (fig. 18 y 19).



Fig. 21. Encofrado de madera a una cara para piezas de doble curvatura.



Fig. 22. Encofrado a dos caras.

Este procedimiento supone un coste alto, ejecución meticulosa y limitación en cuanto a las formas y acabados que se consiguen.

2.4.1.4. Molde de acero.

Utilizados principalmente en moldes a dos caras para la fabricación de elementos muy repetitivos (fig. 20).



Fig. 23. Molde de acero.

No son rentables si se utilizan en piezas singulares y en casos de formas complejas que difícilmente pueden conseguirse. En algunos casos se plantea el problema del llenado, por lo que cuanto menor sea el espesor de la pieza menos posibilidades de utilización.

2.4.1.5. Molde textil inflable con aire a presión.

Es posible utilizar láminas textiles infladas con aire a presión, que sirven como encofrado para el hormigón sobre las que este se proyecta (fig. 21).



Fig. 24. Molde textil inflable.

Puede ser adecuado para casos de proyectos específicos y dependiendo de la geometría deseada, ya que el espesor y la forma de la estructura son difíciles de controlar durante el proceso constructivo y las tolerancias geométricas deben ser grandes. Existen riesgos de dañar el textil, sobre todo en los casos en los es necesario el uso de armaduras de refuerzo y de no conseguir que el aire se mantenga dentro de la cavidad. Por otra parte los trabajos de cortado de textiles, costura y control de las formas deseadas son muy costosos, por lo que este sistema sólo se ha utilizado en ámbito académico.

2.4.2. Hormigón proyectado.

Con la utilización del hormigón proyectado se pueden conseguir formas que se adaptan a la superficie sobre las que se lanza. Para ello es necesario preparar la superficie sobre la que se va a proyectar con alguno de los encofrados a una cara antes descrito. Es muy utilizado el molde de madera por facilidad para adoptar formas curvas, los acabados superficiales no son muy lisos y los encofrados son complicados de colocar, con tiempos largos de ejecución y no reutilizables, lo que eleva los costes finales.

2.4.3. Conformado con moldes flexibles.

Con la utilización de moldes flexibles, se consigue fabricar piezas fina, curvas y de diferentes formas con un mismo molde, con lo que los costes en encofrados se reducen y las posibilidades de diseños no se ven tan afectadas por el coste económico.

Para el uso de forma adecuada de este sistema de fabricación, es necesario controlar tanto los materiales con los que se fabrica el molde, como el hormigón a utilizar, así como poner a punto el procedimiento de doblado según las características de las piezas a fabricar.



Fig. 25. Ejemplo de molde flexible.

Este sistema de fabricación es novedoso y no existe mucha información sobre su técnica, por lo que es necesario investigar el procedimiento óptimo para su utilización y ponerlo a prueba para llegar a descubrir hasta dónde podemos llegar con su desarrollo.

2.5.Procedimiento de conformado del hormigón.

En relación al proceso de conformado de piezas delgadas de UHPFRC, los estudios realizados hasta la fecha se centran en dos líneas de investigación diferenciadas.

Por un lado, en los materiales para la fabricación del molde que servirá de encofrado para las piezas y por otro, en el tipo de hormigón más adecuado para ser deformado.

Un ejemplo de construcción realizada con hormigón conformado citada por Roel Schipper [25], es la cubierta de la Residencia “Het Funen” de NL Architects, en Amsterdam (fig. 26).



Fig. 26. Residential building “Het Funen” with curved cast in site roof (Amsterdam) (izda.) Detalle de construcción (dcha.)

Para su creación se utilizó un software de diseño que permite crear formas de doble curvatura y planificar su construcción dividiéndola en piezas que se fabricaron con hormigón curvado “in situ”.

2.5.1. Molde.

El primer intento de fabricación de un encofrado flexible fue realizado en los años 60, por Renzo Piano, arquitecto italiano, que entre otros, es autor del Centro Pompidou de París o del edificio del New York Times en New York. Realizó un modelo a escala de una cubierta de material plástico utilizando un encofrado que consistía en una capa flexible que podía deformarse dando lugar a la superficie curvada deseada mediante el ajuste de pistones regulables en altura (fig. 27).

Este sistema nunca fue utilizado realmente, porque en ese momento el análisis de fuerzas de este tipo de cubiertas no era posible, pero la mayoría de los encofrados flexibles diseñados posteriormente para elementos de doble curvatura están basados en el principio de Renzo Piano.

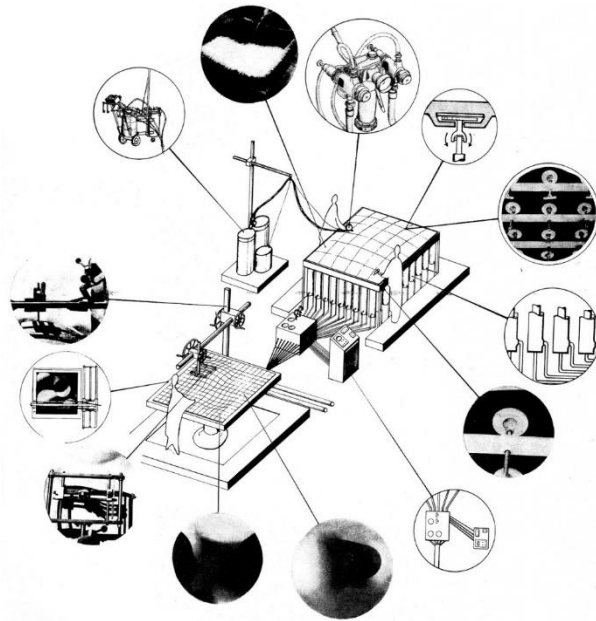


Fig. 27. Diseño del molde flexible diseñado por Renzo Piano.

Otros autores siguieron trabajando en el mismo concepto, como Lars Spuybroek [26] (Fig. 28) y Florian-Peter Kosche [27] (fig. 29).

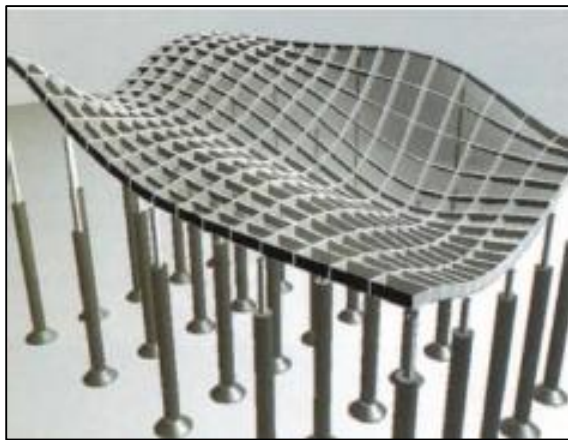


Fig. 28. Dibujo de molde flexible de Lars Spuybroek.

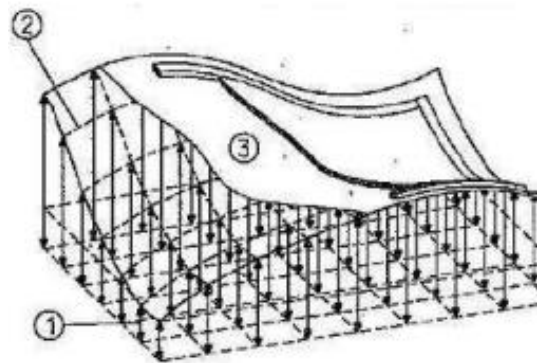


Fig. 29. Diseño de molde flexible de Florian-Peter Kosche.

Los estudios se basaban en crear una superficie flexible que se colocaba sobre unos actuadores y sobre la que se vertía el hormigón estando ésta en posición horizontal. Posteriormente, los actuadores se movían en la vertical provocando el movimiento del molde flexible sobre el que se había vertido el hormigón, obteniendo de esta forma la curvatura de la pieza hormigonada.

El concepto de encofrado flexible, se volvió a discutir y probar a lo largo de los años y también se estudiaron los soportes ajustables.

Jansen H., en 2004 [28], estudió la idea de un molde constituido de pasadores ajustables en altura y que se cubrían con tiras en dos direcciones colocadas a 90 grados una sobre la otra. Sobre estas tiras colocaba una capa de goma para proporcionar al elemento una superficie lisa. Por la interacción entre las dos capas de tiras se podían conseguir piezas con doble curvatura. Estas dos capas proporcionan gran rigidez al conjunto, con lo que se evita colocar un gran número de pasadores debajo (fig. 30).

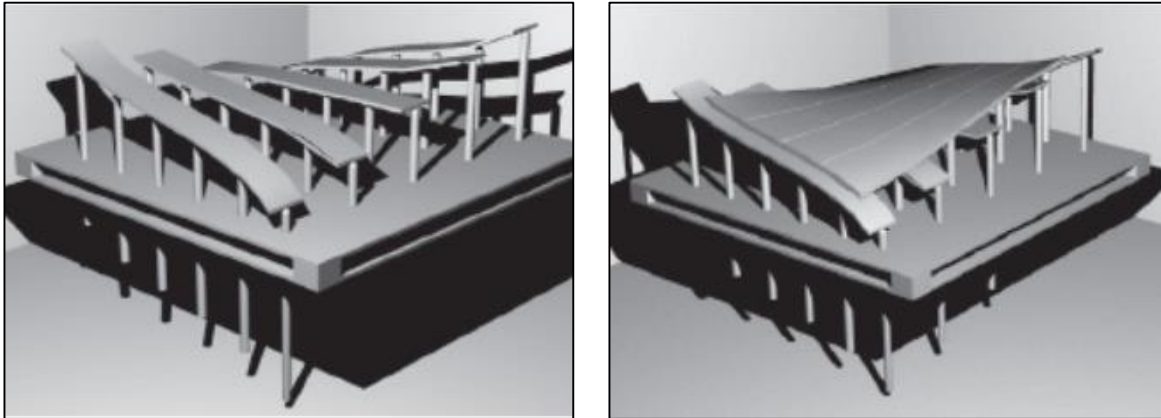


Fig. 30. Molde de H. Jansen con una capa de tiras (izda.) y con las dos capas colocadas (drcha.) [28]

Un problema con este diseño es determinar la mejor distancia entre los pasadores y la elección de la rigidez adecuada de las tiras. Las tiras tienen que ser lo suficientemente rígidas para que soporten el peso del hormigón sin deformarse y suficientemente flexibles para que produzcan la curvatura deseada.

Otra opción es la descrita por M.K.H.M. Van Roosbroeck en 2006 citada por S. Grünwald [29] y que consistía en una cama de apoyo formada por pistones verticales ajustables en altura, cubierta por una superficie lisa donde se vierte el hormigón, que debe ser lo suficientemente resistente para soportar el peso del hormigón y flexible para poder doblarse con el movimiento de los pistones. Los pistones son pequeños y están colocados muy juntos. Este sistema tenía problemas para conseguir superficies lisas y espesores constantes.

Tanto el molde fabricado por Jansen como el de Roosbroeck, no fueron utilizados a escala real, sino que sólo se realizaron algunas pruebas a pequeña escala (fig. 31).



Fig. 31. Elemento fabricado con el molde de M. Van Roosbroeck.

Daan Rietbergen y Karel Vollers en 2007 desarrollaron un prototipo de molde flexible diseñado en un principio para la producción de paneles de vidrio de doble curvatura y patentado para este fin en el año 2009.

Los mismos autores desarrollaron una segunda y tercera patente en 2010 para la fabricación de elementos de hormigón, para elementos de una curvatura (fig. 32) y de elementos de doble curvatura (fig. 33).

El molde para piezas de una curvatura consistía en una celosía de madera en posición horizontal que sirve como apoyo, donde colocan el molde flexible en el que se vierte el hormigón y que posteriormente mueven y apoyan sobre unas tiras de soporte con diferentes alturas y que obligarán al hormigón a tomar una forma curva. Entre el molde flexible y la celosía de apoyo se coloca una lámina intermedia para asegurar que la superficie de la pieza quede suficientemente lisa (fig. 32).



Fig. 32. Patente de molde flexible de Daan Rietbergen y Karel Vollers para elementos de una curvatura.

Con este procedimiento se fabricaron láminas de $2,0 \times 0,20 \times 0,05 \text{ m}^3$ y con un radio mínimo de doblado de 2.5 m, consiguiéndose piezas de una curvatura en las que no se aprecian fisuras una vez endurecido el hormigón ni cambios significativos de espesor en el elemento.

El molde para la fabricación de piezas de doble curvatura consistía en una superficie flexible con una cama de sujeción ajustable (es decir, una red de actuadores). Los actuadores se ajustaban

simultáneamente en altura por un programa informático y en la parte superior de los actuadores se colocaba una capa flexible que hacía la función de encofrado (fig. 33).

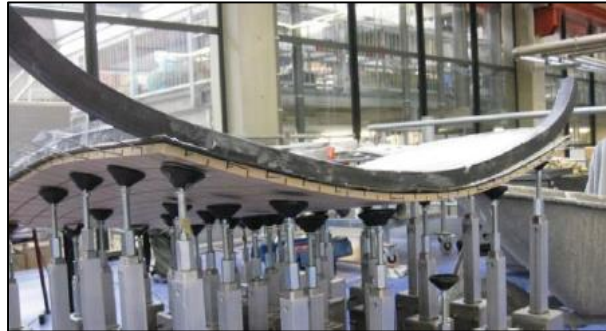


Fig. 33. Molde patentado por Daan Rietbergen y Karel Vollers para elementos de doble curvatura.

A partir de estas patentes se han realizado varios estudios en la Universidad Tecnológica de Delft (Holanda), por Roel Schipper, S. Grünwald, K J Vollers, entre otros, en los que se analizan diversos factores que pueden afectar al proceso de conformado, como pueden ser las propiedades de los hormigones utilizados, el momento de doblado, el material utilizado en la fabricación de moldes, etc.

Factores a tener en cuenta a la hora de elegir el molde adecuado son, el peso del hormigón que se va a utilizar, es decir, densidad, tamaño y espesor de la pieza a fabricar; forma elegida para la pieza, rigidez del material con el que se fabricará el molde y que va a permitir mayor o menor curvatura, ya que si el material es demasiado rígido puede hacer que algunos de los actuadores queden en el aire, sin estar en contacto con el molde, o si ocurre el caso contrario en el que el molde es demasiado flexible, se deformará entre los soportes creando irregularidades en la superficie, como se explica en la figura 34.

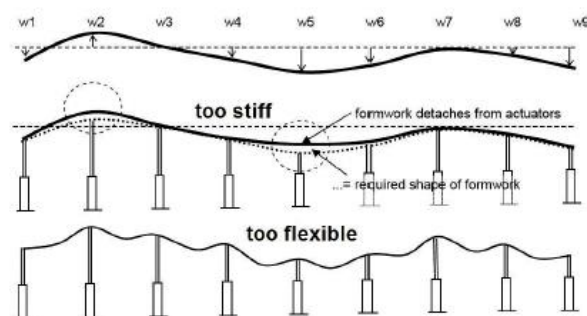


Fig. 34. Esquema del comportamiento de pistones y capa intermedia.

Otro factor a tener en cuenta en el diseño del molde para conseguir superficies regulares, es la distancia a la que se colocan los soportes o actuadores, ya que esto va a determinar que la superficie generada una vez doblada sea regular y mantenga la curvatura en toda la pieza.

Para simular el comportamiento del molde que va a ser flexionado con una única curvatura, el primer modelo de cálculo que se utilizó puede ser descrito mediante la ecuación diferencial de cuarto orden de Euler-Bernoulli [30].

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q(x).$$

Esta ecuación relaciona la carga externa q (necesaria en nuestra situación para doblar el encofrado), la cuarta derivada de los desplazamientos verticales $w(x)$ y la rigidez a la flexión del encofrado IE , con lo que se puede conseguir las reacciones de apoyo.

En la figura 35 se muestra un ejemplo de una pieza y los momentos de flexión resultantes en el encofrado y las fuerzas en los puntos de apoyo.

Simulando informáticamente la rigidez del encofrado, utilizando la ecuación de Euler-Bernoulli, podemos conocer la respuesta que va a tener cuando se le aplique la carga externa correspondiente al hormigón y como consecuencia, la forma final de la pieza fabricada [30].

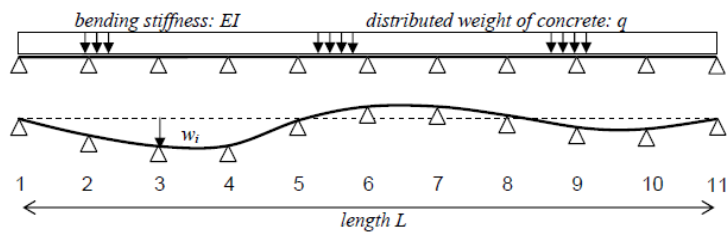


Fig. 35. Modelo mecánico de encofrado para elementos de una curvatura [30].

Existen modelos de cálculo más complejos para describir procesos de doblado en dos direcciones pero no son objeto del presente trabajo.

2.5.2. Hormigón.

Según información publicada por Grunewald y Schipper en 2013 [31], con la medida de las propiedades reológicas del hormigón podremos determinar el momento idóneo para realizar el proceso de conformado del hormigón. Las mediciones realizadas muestran que el comportamiento tixotrópico del hormigón conduce a un rápido aumento de la resistencia del hormigón fresco, pero deja el hormigón deformable con el fin de prevenir las grietas causadas por el movimiento del molde.

Para el proceso de conformado que estamos investigando necesitamos conocer el momento en el que el hormigón tiene un valor de resistencia baja, adecuada para permitir dar la curvatura requerida al elemento, pero con suficiente consistencia para que no se produzcan segregaciones de material.

El hormigón, una vez colocado en el molde, va a sufrir un proceso de deformación y a pesar de esto debe de mantener sus propiedades intactas, para que pueda cumplir su función estructural. Por lo tanto, deberá tener resistencias suficientemente altas y presentar unas características de durabilidad y acabado muy exigentes, además de poco espesor de capa, para que sean interesantes desde el punto de vista arquitectónico.

De esta forma, será necesaria la utilización de hormigones muy fluidos o autocompactantes, para favorecer el proceso de colocación en el molde; que presenten tamaño máximo de árido no muy grande, para garantizar el buen acabado; y sobre todo, unas características que aseguren que su resistencia no se vea perjudicada durante o después del proceso de deformación.

Por estos motivos los investigadores que han experimentado sobre el tema [29], han utilizado hormigones autocompactantes, ya que sus propiedades reológicas (retracción y fluencia) parecen ser particularmente importantes para el diseño de una mezcla adecuada. Esta característica permite la fabricación de hormigón con un valor de rendimiento menor que el límite elástico crítico, es decir, con una fluidez alta.

De Larrard [32], se refiere a la reología como una herramienta adecuada para la solución de problemas de ingeniería en el caso de hormigón fresco, más específicamente para la determinación de la resistencia a la fluencia y propone la *Ecuación 1* para estimar la resistencia crítica a la fluencia.

$$\text{Ecuación 1} \rightarrow \tau_{0,crit} = \rho * g * h * \text{sen } \theta$$

Con ella describe el equilibrio de una losa de hormigón fresco sobre una pendiente, que se producirá cuando esta adquiera un valor de resistencia mínima (τ_0) y que depende de la densidad del hormigón (ρ), aceleración de la gravedad (g), espesor de la capa de hormigón (h) y del ángulo de inclinación (θ) (fig. 36).

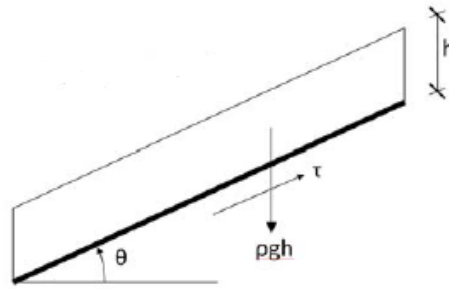


Fig. 36. Hormigón bajo pendiente según De Larrard.

Basándose en la fórmula de De Larrard, esta expresión fue adaptada por Roel Schipper y Steffen Grünewald para hormigones deformados [31].

$$\tau_{0,crit} = \rho * g * h * L/2 * R$$

Donde: ρ : densidad, g : peso de hormigón, L : longitud de la cuerda en la dirección horizontal, h : espesor de capa y R : radio.

Realizaron una simulación de la hipotética distribución tensional que se produciría en el hormigón en la situación de deformado dependiendo del espesor (h) y el radio (R) (fig. 37).

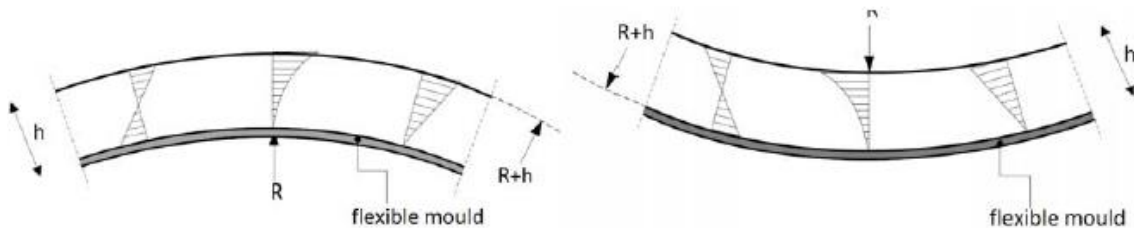


Fig. 37. Posible distribución de tensiones en hormigón fresco después de la deformación [31].

De esta manera calculan la resistencia mínima que debe tener el hormigón para que no segregue en posición curva y sea estable en esta forma.

Después de su análisis experimental [31] obtuvieron que el límite de resistencia mínima en el hormigón fresco ensayado debía estar entre 50 y 1600 Pa, dependiendo de la geometría del molde.

Otros trabajos realizados por los mismos autores [29] les llevaron a demostrar que la inclusión de fibras de vidrio, la disminución del tamaño máximo de árido o el uso de aditivos puede mejorar la cohesión de la pasta. La vibración del hormigón en el molde antes del deformado, puede llevar

a que se obtenga antes la resistencia mínima requerida para el doblado, reduciendo así el tiempo de espera entre la fabricación del hormigón y el conformado.

Por toda la información recogida podemos pensar que la utilización de UHPFRC para el proceso de conformado es favorable para el fin que se pretende, ya que reúne las propiedades idóneas para el proceso por su tamaño máximo de árido, el uso de adiciones que mejoran las propiedades de cohesión, además de ser un hormigón autocompactante y presentar unas propiedades de acabado de superficies idóneas para su uso en diseños arquitectónicos.

Estas características permiten la colocación de hormigón con un valor de rendimiento mucho más bajo (una fluidez más alta) que el límite elástico crítico. Se aprovecha la acumulación tixotrópica para deformar el molde, dentro de un corto período de tiempo, después de la colocación. La tixotropía aumenta la resistencia a la fluencia y la capacidad del hormigón para mantener su posición después de la deformación del molde. Dependiendo del parámetro tixotrópico, tendremos más o menos tiempo con hormigón en un estado de suficiente resistencia a la fluencia para ser deformado sin escurrimiento y no tanta como para que se vea afectado por el movimiento.

Es necesario utilizar hormigones autocompactantes ya que la fluidez inicial del hormigón facilita su transporte al molde y su buena adaptación a la forma finalmente deseada. Durante el proceso de endurecimiento el fluido va pasando a sólido en un tiempo que puede variar desde unos minutos a horas e incluso días, dependiendo de muchos factores, como el tipo y la dosificación de cemento, la temperatura, tipos de áridos y granulometrías, aditivos tales como plastificantes, aceleradores o retardadores, etc.

Según la publicación de Roussel [33], de 2006, sobre el comportamiento tixotrópico de las pastas de cemento, existe un periodo de tiempo de unos dos mil segundos en los que los efectos irreversibles de la hidratación del cemento no son dominantes, en los que predomina el comportamiento coloidal o tixotrópico de la pasta de cemento. Sin embargo en investigaciones recientes realizadas por Roussel et al. [34] se muestra que desde el momento siguiente al mezclado comienzan los procesos de hidratación del cemento, formándose enlaces de CSH, pero que todavía se pueden dividir relativamente fácil y reconstruirse de nuevo, siempre y cuando exista suficiente material reactivo, lo que explica el comportamiento tixotrópico que se observa a escala macro del material durante la deformación en el molde flexible.

El método del molde flexible utilizado por Grünewald y Schipper, consiste en la deformación del hormigón en un momento específico durante el tiempo de fraguado, como se explica gráficamente en la figura 38 [35].

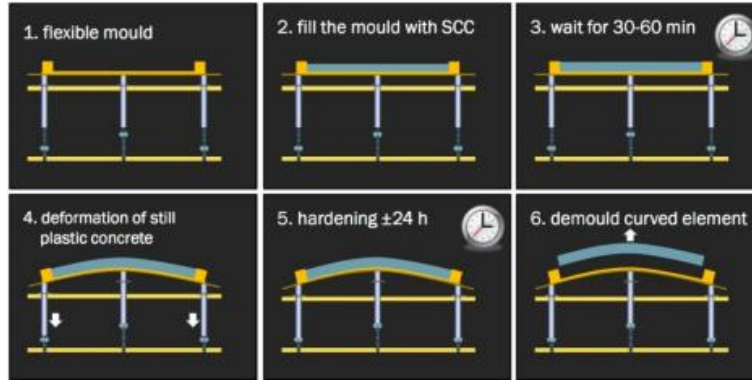


Fig. 38. Explicación del proceso de moldeado: 1) Molde flexible soportado por un sistema de pistones; 2) relleno de molde con hormigón autocompactante; 3) tiempo de espera a que inicie el fraguado; 4) deformación del molde; 5) endurecimiento del hormigón en su posición curvada final; 6) desmoldeo de la pieza curvada.

La deformación se lleva a cabo en la etapa de transición entre la fase líquida y la fase sólida del hormigón para que no existan riesgos de agrietamiento. Janssen [36] representa gráficamente el momento de transición entre estas dos fases en la figura 39.

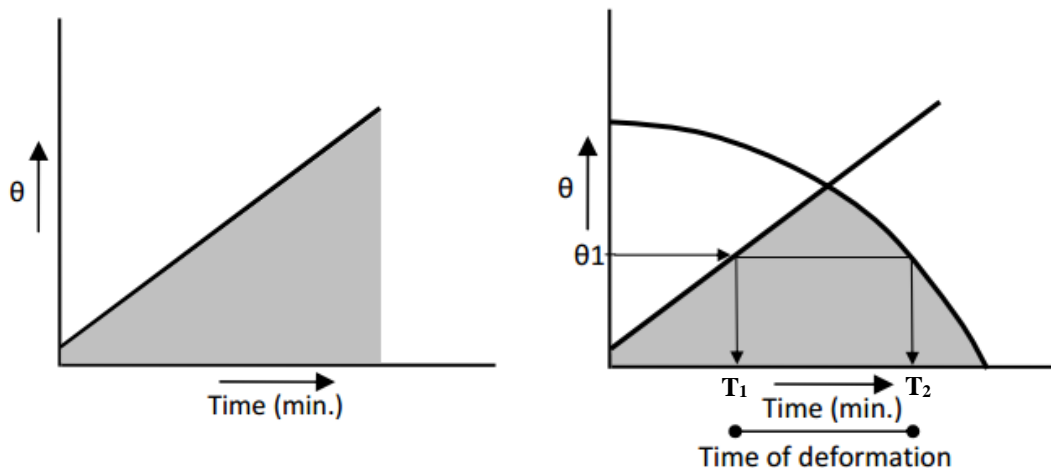


Fig. 39. Primer modelo de Bas Janseen.

El proceso de fabricación mediante el método del molde flexible, puede ser interpretado desde un punto de vista mecánico como una deformación impuesta. Como resultado de esta deformación parte del hormigón se inclina y otra parte rota desde su posición horizontal original. Los desplazamientos están en el orden del grosor de la pieza, y la rotación puede llegar hasta los 45° con respecto a la horizontal. Para que el hormigón no fluya fuera del molde en el momento del doblado, es necesaria una mínima resistencia a la cizalla para permitir que el molde con el hormigón soporte un determinado ángulo de inclinación. Esto está representado en el eje vertical de la figura 39 (izda.) como θ . La superficie gris de la figura 39 (izda.), representa los tiempos en

los que el hormigón es estable en función del ángulo de inclinación, para espesores de 50 mm con los que se realizan los ensayos.

La figura de 39 (dcha.) representa el límite de agrietamiento y el intervalo de tiempo de deformación dependiendo de la inclinación. Para un ángulo θ_1 , el molde no puede ser deformado antes del tiempo t_1 . Este tiempo t_1 es considerado el límite inferior de deformación, que se produce como resultado de la resistencia producida durante la creación de los enlaces CSH debidos a la hidratación del cemento. Sin embargo la resistencia producida llega un momento en el que aumenta hasta tal punto que deja de ser posible la deformación plástica del hormigón, esto se representa en el gráfico como el momento t_2 , considerado como el límite superior de deformación. A medida que el hormigón endurece el ángulo de deformación posible sin agrietamiento es menor. Cuanto menor es el ángulo de deformación mayor es el intervalo de tiempo en el que el hormigón puede deformarse. La zona deformable dependerá de la composición de la mezcla y del peso específico de la misma.

El tiempo definido entre el límite inferior t_1 y el límite superior t_2 , es el periodo dentro del cual puede producirse la deformación del hormigón.

En varios artículos se describe la relación entre el asentamiento y la resistencia a la fluencia.

Roussel & Coussot [37] comparan los resultados de asiento en cono y viscosímetro con los resultados con simulaciones numéricas y modelos analíticos. Bajo condiciones específicas, determinan la relación existente entre el límite elástico del hormigón τ_0 y el diámetro del cono R para un determinado volumen V. Esta relación resultó bastante adecuada al comportamiento real en hormigones autocompactantes:

$$\tau_0 = \frac{225 \cdot \rho \cdot g \cdot V^2}{128 \cdot \pi \cdot R^5}$$

Existen otras fórmulas empíricas similares [38] [39], para hormigones más rígidos en las que se relaciona el asiento en cono, con el límite elástico del hormigón, aunque existe mayor divergencia en los resultados, debido entre otros factores al volumen de agregados y a la diferente calibración en los viscosímetros utilizados en las medidas.

En uno de los trabajos realizados recientemente en la Universidad Tecnológica de Delft se determinan que la resistencia necesaria para la geometría utilizada y tipo de hormigón, debía estar entre 94 y 314 Pa para que no se produjera escurrimiento ni agrietamiento una vez realizado el doblado [31].

Posteriormente, los mismos autores describen los experimentos realizados con distintos tipos de hormigón en los que se calculan los tiempos t_1 y t_2 en los que se podrá doblar el hormigón y las resistencias a las que equivaldría cada uno de esos tiempos [35].

2.5.3. Sanación autógena.

La sanación autógena, o natural, del hormigón, es la capacidad que tiene este material para recuperar sus propiedades después de sufrir un daño, que generalmente aparece en forma de fisuras. La sanación autógena se debe principalmente a la hidratación continuada y a la carbonatación [40].

La componente debida a la hidratación continuada sigue el siguiente proceso: tras la aparición de fisuras, estas partículas entran en contacto con agua, ya sea de lluvia o por la humedad y reaccionan formando productos de la hidratación que rellenan las fisuras y poros.

El hormigón utilizado en esta investigación es de altas prestaciones reforzado con fibras, por lo que aúna las características de un hormigón de muy altas prestaciones con las de hormigones reforzados con grandes cantidades de fibras.

Por un lado, en los hormigones de muy altas prestaciones, debido a la gran cantidad de cemento y la baja relación agua/conglomerante con la que se fabrican, contiene más partículas de cemento que sin hidratar que los hormigones convencionales.

Por otra parte, el alto contenido en fibras le confiere al material un comportamiento de mayor tendencia a la microfisuración en lugar de favorecer la formación de una macrofisura. Es decir, las fisuras serán pequeñas, debido la restricción que imponen las fibras, hecho que favorece la sanación autógena, como demostraron Reinhardt y Joos [41] comparando el comportamiento de varios tamaños de fisuras comprendidas entre 0,05 y 0,2 mm.

De hecho, K. van Breugel [42] afirma que en un hormigón tradicional aproximadamente entre el 20 y el 30% de las partículas del cemento se quedan sin hidratar; mientras que en los estudios de Granger et al. [43], que estudian la sanación autógena de hormigones de altas prestaciones con relaciones de A/C muy bajas (0,2), el cemento que permanece sin hidratar lo estimaron en torno al 50-60%. Cuanto mayor sea la cantidad de cemento y menor la relación agua/cemento, mayor será la cantidad de cemento sin reaccionar y por tanto, mayor potencial de sanación autógena debida a la hidratación continuada.

En el estudio de Granger et al. [43] concluyen que la sanación de sus fisuras se debía principalmente a la hidratación del clínker sin hidratar y que la rigidez de los nuevos cristales resultaba ser similar a la de la matriz original del hormigón.

En la UPV se llevan a cabo investigaciones sobre las propiedades de sanación autógena y sanación autónoma de los hormigones con resultados positivos en fenómenos de cierre de fisuras e impermeabilización en mayor medida en las producidas a edades tempranas [44].

Con estos antecedentes podemos suponer que la capacidad de autosanación presentada por los UHPFRC favorece el desarrollo del conformado, ya que si en el proceso se produjera alguna pequeña fisuración se produciría el autosellado de la misma, evitando la pérdida de prestaciones del hormigón, e incluso se podría plantear la posibilidad de inclusión de aditivos cristalinos que favorecieran la autosanación.

Este fenómeno, aunque si bien se tiene presente a la hora de la realización del programa experimental, no es el objeto de este trabajo, por lo que se plantea como futuras líneas de investigación.

2.6. Otras aplicaciones fuera del hormigón.

El sistema de construcción mediante fabricación de piezas planas y posterior conformado, se utiliza ya con otros materiales. Esto nos puede servir como base inicial del trabajo, adaptándolo para su utilización en la fabricación de piezas de hormigón.

2.6.1. Fabricación de tejas de arcilla.

Existen varias técnicas de fabricación, alguna más rudimentaria en la que la mezcla de arcilla y agua se extiende en una superficie plana y posteriormente se coloca sobre un molde curvo, de forma que la arcilla adopta la forma del molde (fig. 23).

Otra técnica más elaborada consiste en hacer pasar la mezcla de arcilla y agua por una máquina de extrusión que aplica una presión y la hace pasar por una boquilla que le da la forma definitiva a la teja (fig. 24).

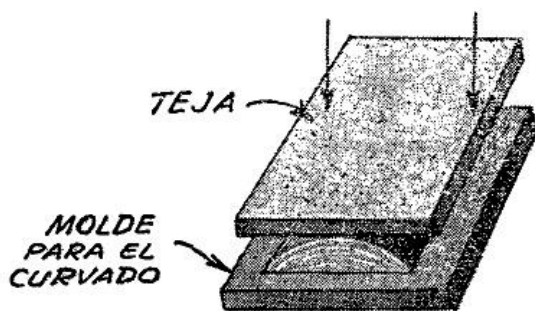


Fig. 40. Fabricación de tejas por moldeado.



Fig. 41. Máquina formadora de tejas por extrusión.

2.6.2. Prensado de chapa para fabricación de piezas de automóvil.

El sistema de fabricación de las piezas de chapa de automóviles es semejante al que se pretende ahora aplicar a la industria del hormigón, ya que consiste en fabricar piezas planas y lisas que posteriormente se colocan sobre una base con la forma que se quiere dar a la chapa y sobre la que se coloca la pieza fabricada lisa, de tal manera que al colocarla sobre ella y después de aplicarle una presión instantánea la chapa adquiere la forma deseada (fig. 25) [45].



Fig. 42. Apilado de láminas de chapa planas, antes de ser conformadas.

3. Programa experimental.

3.1. Metodología utilizada.

El principal objetivo del trabajo es conocer cómo afecta el proceso de doblado de placas de UHPFRC con curvatura simple, en un periodo de tiempo a determinar, comprendido entre el inicio y fin de fraguado del mismo y si esto influye en sus características resistentes y de acabados.

Se plantea un trabajo en dos fases.

- En la primera, a partir de dos dosificaciones base de UHPFRC (D1 y D2) desarrolladas en estudios previos [17] diferenciadas entre sí, únicamente por el aditivo superplastificante, se analiza la posibilidad de controlar los tiempos durante los cuales la masa de hormigón es susceptible de ser moldeada, manteniendo la forma que se le confiere, sin necesidad de un encofrado cerrado, y sin que ello perjudique a sus características mecánicas en estado endurecido.

Dado que en los UHPFRC base son altamente autocompactantes y su fluidez se mantiene durante un largo periodo de tiempo se plantea el empleo de aditivos aceleradores de fraguado para reducir el periodo de espera. Se compara el efecto de 5 aditivos aceleradores de fraguado. El efecto en la resistencia a compresión y flexo-tracción se valora ensayando probetas prismáticas (40 mm x 40 mm x 160 mm).

En la *tabla 1* se muestra un esquema con el número de probetas ensayadas de cada tipo de dosificación y tipo de ensayo.

Dosificación base	Aditivo acelerador	Ensayos realizados						
		Tiempos de conformado	Resistencia flexo-tracción en probetas			Resistencia compresión en probetas		
			3 días	7 días	28 días	3 días	7 días	28 días
D1	Control (sin acelerador)	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	SIKA SIKASET 3	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	BASF X SEED 130	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	GRUPO IQE AKF-63	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	GRUPO IQE ACE-2402	≥ 3	2	2	2	4	4	4
D2	Control (sin acelerador)	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	SIKA SIKASET 3	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	BASF X SEED 130	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	GRUPO IQE AKF-63	≥ 3	2	2	2	4	4	4
	GRUPO IQE ACE-2402	≥ 3	2	2	2	4	4	4

Tabla 1. Esquema de probetas ensayadas en primera fase experimental.

El número de ensayos de tiempos de conformado ha variado en función del avance del estudio, ya que si bien inicialmente era necesaria la definición y mayor número de pruebas a realizar para determinar el intervalo de tiempo buscado, con la experiencia esta determinación se fue haciendo más clara, por lo que era necesario menor número de pruebas. En todos los casos el mínimo número de repeticiones para una misma determinación fue ≥ 3 .

Tras la primera fase, se seleccionan dos fórmulas de trabajo que sólo se diferenciarán entre sí por la incorporación o no de uno de los aceleradores de fraguado estudiados, y que habrán sido caracterizadas por medio de sus tiempos de conformado y resistencias.

- En la segunda fase de ensayo se fabricarán con estas mezclas placas de 30 x 15 x 2 cm con dos sistemas diferentes, por un lado moldeadas, en las que se utilizan moldes curvos que le aportarán la forma a la pieza y por otro mediante conformado, utilizando moldes flexibles y que se doblarán una vez vertido el hormigón en ellos y en el momento adecuado. Se realizarán placas con dos curvaturas diferentes y con dosificación control y con acelerador.

Tras la fabricación y curado, las probetas se ensayarán a flexión, en posición cóncava y convexa, con el fin de averiguar su respuesta mecánica y poder comparar los valores obtenidos con uno y otro sistema de fabricación.

En las *tablas 2 y 3* se presenta un esquema de las placas fabricadas y características en cuanto a curvatura, dosificación, posición de rotura y modo de fabricación. Con el total de placas obtenemos 3 valores de resistencia a flexión de cada tipo de placa.

Curvatura	Dosificación	Rotura	Fabricación	Nº de placa
C1	Sin acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C1D1
				C1D2
				C1D3
		Placas moldeadas	C1S1	
			C1S2	
			C1S3	
	Posición convexa	Placas conformadas	C1D4	
			C1D5	
			C1D6	
		Placas moldeadas	C1S4	
			C1S5	
			C1S6	
Con acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C1D7	
			C1D8	
			C1D9	
	Placas moldeadas	C1S7		
		C1S8		
		C1S9		
Posición convexa	Placas conformadas	C1D10		
		C1D11		
		C1D12		
Placas moldeadas	C1S10			
	C1S11			
	C1S12			

Tabla 2. Características de placas fabricadas en segunda fase experimental. Curvatura C1.

Curvatura	Dosificación	Rotura	Fabricación	Nº de placa
C2	Sin acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C2D1
				C2D2
				C2D3
		Placas moldeadas	C2S1	
			C2S2	
			C2S3	
	Posición convexa	Placas conformadas	C2D4	
			C2D5	
			C2D6	
		Placas moldeadas	C2S4	
			C2S5	
			C2S6	
Con acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C2D7	
			C2D8	
			C2D9	
	Placas moldeadas	C2S7		
		C2S8		
		C2S9		
Posición convexa	Placas conformadas	C2D10		
		C2D11		
		C2D12		
Placas moldeadas	C2S10			
	C2S11			
	C2S12			

Tabla 3. Características de placas fabricadas en segunda fase experimental. Curvatura 21.

3.2. Materiales.

3.2.1. Hormigón.

Las materias primas utilizadas para la dosificación de los diferentes tipos de mezclas se describen a continuación:

3.2.1.1. Cemento.

Después del amplio estudio de dosificaciones de UHPFRC realizados en la UPV [17] habitualmente se recurre a cementos de clase resistente intermedia para reducir el calor de hidratación y la demanda de agua. El uso de cementos con bajo contenido en A3C puede incrementar la trabajabilidad y favorecer una evolución de resistencias más repartida en el tiempo.

También pueden ser adecuados otros cementos combinados con una buena adición, pero en nuestro caso el cemento utilizado ha sido un tipo I, 42,5 SR, LAFARGE ESFERA S. A. (fig. 40).

3.2.1.2. Humo de sílice como adición activa.

Se ha utilizado humo de sílice Elkem Microsilica® 940 U (fig. 41). Se trata de humo de sílice seco, sin densificar, de densidad entre 200 y 350 kg / m³, con tamaño medio de partícula de las esferas de aproximadamente 0,15 micras, aunque la mayoría forman agregados de entre 0,1 y 1 micra y aglomerados secundarios de entre 5 y 50 micras.

Es un producto certificado por la norma ISO 9001, lo que asegura la calidad de su composición química y física.

3.2.1.3. Harina de cuarzo como adición inerte.

La adición de harina de cuarzo a las dosificaciones permite reducir el contenido de cemento y complementar la curva granulométrica para los tamaños más pequeños.

En nuestro caso utilizamos harina de cuarzo U-S 500, SIBELCO HISPANIA, fabricado por la empresa SIKA, compuesta en más de un 90 % por sílice cristalina (fig. 42).

3.2.1.4. Áridos silíceos de pequeños tamaños (<2 mm).

Se utiliza árido silíceo por su alta resistencia mecánica. Los tamaños elegidos son, arena fina de 0,4 mm (fig. 43) y arena media de 0,8 mm (fig. 44).



Fig. 43. Cemento tipo I, 42,5 SR, LAFARGE ESFERA S. A.

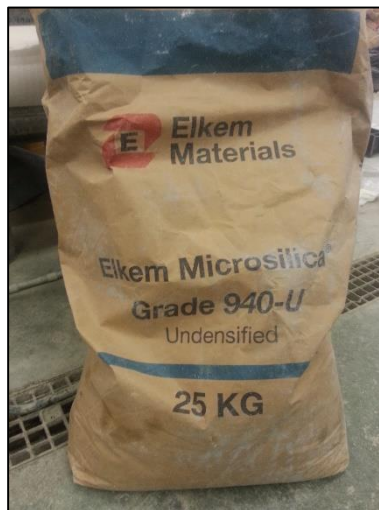


Fig. 44. Humo de sílice Elkem Microsilica® 940 U



Fig. 45. Harina de cuarzo U-S 500, SIBELCO HISPANIA



Fig. 46. Arena sílicea 0,4 mm.



Fig. 47. Arena sílicea 0,8 m

3.2.1.5. Aditivos superplastificantes de tercera generación.

Se han utilizado dos aditivos superplastificantes diferentes, uno en la dosificación 1 y otro en la 2, para comprobar su comportamiento frente al fraguado y resistencias y posteriormente elegir una dosificación en base a los resultados obtenidos.

- *SIKA VISCOCRETE 20 HE.*

Aditivo superplastificante de altas prestaciones que produce autocompactación de la mezcla, reducción de agua de amasado, altas resistencias iniciales, disminuyendo la fluencia y la retracción del hormigón (fig. 45).

Su composición química es policarboxilato modificado en base acuosa, líquido viscoso, con una densidad aproximada de 1,085 gr/ cm³, contenido en sólidos de 40 % y PH aproximado de 4,5.

Este aditivo fue utilizado en las mezclas de la dosificación 1.

- *SIKA VISCOCRETE 225.*

Superplastificante en polvo de altas prestaciones es reductor de agua que consigue excelente fluidez, con bajo tiempo de absorción, aumenta las resistencias iniciales y mejora la retracción y la fluencia en el hormigón (fig. 46).

Compuesto por carboxilatos en polvo y compatible con otros aditivos.

Este aditivo fue utilizado en las mezclas de la dosificación 2.

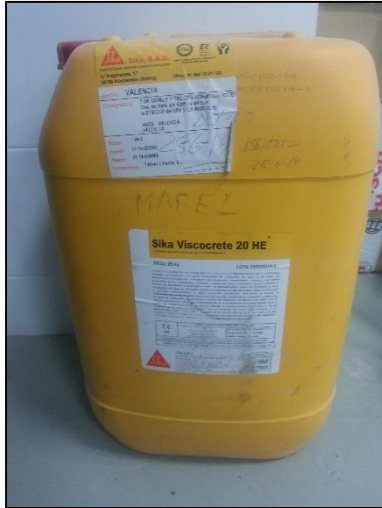


Fig. 48. Superplastificante SIKA VISCOCRETE 20 HE.



Fig. 49. Superplastificante SIKA VISCOCRETE 225.

3.2.1.6. Aditivos aceleradores del fraguado.

Se utilizaron una serie de aditivos aceleradores de fraguado para estudiar cuál era su comportamiento en las dos dosificaciones de base, para finalmente elegir uno de ellos que fue utilizado para la fabricación de algunas de las placas.

- *SIKA SIKASET 3.*

Acelerante de fraguado en forma líquida, exento de cloruros, favorece el desarrollo de las resistencias mecánicas iniciales del hormigón, no contiene cloruros, por lo que se puede utilizar sin riesgos, tanto en hormigón armado como pretensado, duplica las resistencias mecánicas entre 5 y 10 horas para cualquier tipo de cemento, manteniendo o aumentando las resistencias a 28 días, por lo que permite un rápido desencofrado del hormigón.

Su composición química es una combinación de compuestos orgánicos y minerales, posee una densidad aproximada de 1,25 kg/l a 20 °C y un valor de PH aproximado de 8 (fig. 47).

- *BASF X SEED 130.*

Agente activador de la hidratación del cemento para potenciar el desarrollo de resistencias iniciales y finales del hormigón (fig. 48).

Suspensión de nanopartículas de CSH que actúan como núcleo de cristalización facilitando la formación acelerada de gel CSH en la solución y favoreciendo las resistencias iniciales a cualquier temperatura sin afectar a las resistencias finales o incluso mejorándolas y construyendo una microestructura más cerrada que favorece la durabilidad del hormigón.

- *ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500.*

Aditivo acelerador de endurecimiento del hormigón, aportando altas resistencias tempranas incluso a temperaturas bajas. El efecto de aceleración depende de la reactividad de los cementos y de la relación agua/cemento. Se presenta en forma líquida (fig. 49).

- *GRUPO IQE AKF-63.*

Acelerante líquido, libre de álcalis, débilmente agresivo para el medioambiente, incrementando la durabilidad y calidad de las estructuras (fig. 50).

- *GRUPO IQE ACE-2402.*

Acelerador de tercera generación, del mismo fabricante que el anterior pero que se presenta en forma sólida (fig. 51).



Fig. 50. SIKASET 3

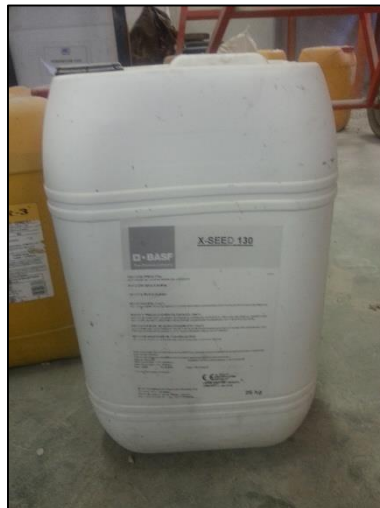


Fig. 51. BASF X SEED 130

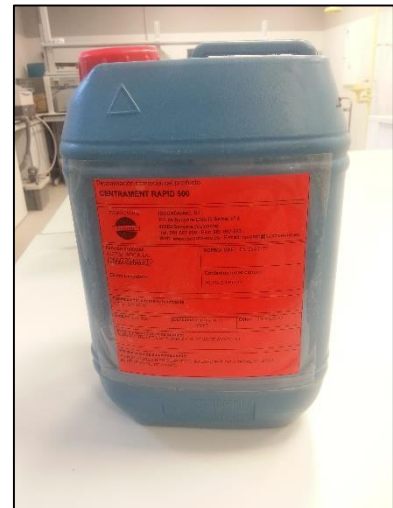


Fig. 52. ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500.



Fig. 53. GRUPO IQE AKF-63.



Fig. 54. GRUPO IQE ACE-2402.

3.2.1.7. Agua.

El agua que se utiliza proviene de la red de agua potable de la Universidad Politécnica de Valencia.

3.2.1.8. Fibras de alta límite elástico.

Se utilizan fibras metálicas de alto límite elástico, longitud 13 mm y diámetro 0,20 mm.



Fig. 55. Fibras metálicas.

3.2.2. Moldes y encofrados.

3.2.2.1. Moldes curvos.

Los moldes curvos consisten en una base de madera en la que se realizan dos acanaladuras con la curvatura deseada y paralelas, en las que se introducen dos láminas de metacrilato (material flexible) y que adoptan la forma de las acanaladuras en las que se fijan, de tal forma que quede un espacio libre de 2 centímetros entre ellas, que corresponde al espesor del canto de la pieza.

Las láminas se fijarán en su parte exterior y en toda su longitud mediante tiras de madera verticales, para que la presión que ejerce el hormigón en el momento del vertido no produzca deformaciones en ella y de esta manera conseguir una superficie lisa con curvatura regular en la pieza hormigonada.

El hormigón se vierte por la parte superior y una vez endurecido y desmoldeado nos dará las piezas con las curvaturas deseadas.

Con este sistema se fabrican dos series de moldes con las curvaturas C1 (fig. 53) y C2 (fig. 54).



Fig. 56. Molde para fabricación de 2 placas de curvatura C1.



Fig. 57. Molde para fabricación de placas de curvatura C2.

3.2.2.2. Moldes flexibles.

Los moldes flexibles fueron fabricados utilizando un material de dos componentes líquidos a base de elastómeros de silicona que una vez mezclados y vertidos sobre un contramolde de aglomerado de madera y esperadas unas horas se convierte en un material sólido y flexible y con la forma deseada. Las dimensiones interiores de los moldes son 30 x 15 x 2 cm (fig. 55).



Fig. 58. Moldes flexibles.

3.2.2.3. Mesas de apoyo.

Para el proceso de conformado, además de los moldes flexibles descritos anteriormente, se necesitó fabricar bloques o mesas de apoyo, con las curvaturas que se quería que adoptaran las piezas, sobre las que se apoyaban y fijaban los moldes, de tal forma que una vez fraguado el hormigón este mantiene la forma curva de la mesa de apoyo.

Se fabrican dos series de mesas de apoyo. Para la curvatura C1 consiste en un bloque de hormigón fabricado a partir de un molde semicircular de metal con el que se realiza un encofrado y se hormigona, dejando unos huecos en el centro para poder introducir los gatos que servirán para sujeción de los moldes flexibles (fig. 56 y 57).



Fig. 59. Encofrado para fabricación de dos mesas de apoyo de curvatura C1.



Fig. 60. Mesa fabricada para curvatura C1.

Para el apoyo de los moldes de curvatura C2 se utilizaron piezas semicirculares de PVC con diámetro 30 cm exterior, que nos proporciona un radio de doblado de 15 cm correspondiente a la

curvatura C2. Estas piezas al ser huecas dejan espacio suficiente en su parte inferior para introducir los gatos que van a sujetar los moldes flexibles en el momento del doblado (fig. 58).



Fig. 61. Apoyo para conformado de placas de curvatura C2

3.3. Primera fase de ensayo.

3.3.1. Definición de dosificación de trabajo.

El diseño se ha realizado con hormigón de muy altas resistencias reforzado con fibras con dos dosificaciones de partida comúnmente utilizadas, en las que el único ingrediente que las diferencia es el tipo de superplastificante utilizado. El resto de materiales será común en las dos.

En todas las amasadas realizadas se ha ajustado la dosificación de superplastificante para mantener el escurrimiento según UNE-EN 1015-3 [46] de 21-22 cm ya que se considera que esto proporciona una trabajabilidad adecuada para la fabricación de piezas curvas y para su posible aplicación práctica en láminas finas y formas complejas. Se utiliza una dosificación D1 fabricada con aditivo superplastificante líquido y otra D2 con aditivo superplastificante en polvo (tabla 4).

Dosificación D1		Dosificación D2	
Material	gr/l	Material	gr/l
CEM 42,5 R/ SR LAFARGE ESFERA	750	CEM 42,5 R/SR LAFARGE ESFERA	750
Arena gruesa 0,8 mm. sílicea	595	Arena gruesa 0,8 mm. sílicea	595
Arena fina 0,4 mm. sílicea	320	Arena fina 0,4 mm. sílicea	320
Humo de sílice 940-U	175	Humo de sílice 940-U	175
Harina SIBELCO	225	Harina SIBELCO	225
SIKA VISCOCRETE 20HE (líquido)	23	SIKA VISCOCRETE 225 (polvo)	8
Fibra OL 13/0,2 BEK	160	Fibra OL 13/0,2 BEK	160

Tabla 4. Materiales de dosificaciones base.

Los datos fijados en la *tabla 3* corresponden a los pesos utilizados para cada amasada, que tiene un volumen de 1 litro.

La cantidad de agua será controlada en cada caso, dependiendo del superplastificante utilizado y de las variaciones que dentro del mismo tipo puedan existir utilizando envases diferentes, por lo que no se incluye en la tabla. En todos los casos estamos trabajando con relaciones agua/conglomerante inferiores a 0,20.

A cada una de estas dosificaciones se incorpora 1 de los 5 tipos de aceleradores de fraguado para averiguar la influencia de ellos en los tiempos de inicio y fin de fraguado y resistencias en probetas. Estos ensayos previos se realizaron sin la inclusión de las fibras metálicas.

3.3.2. Determinación del tiempo de conformado.

Para la determinación de los tiempos de fraguado en hormigones (UNE-EN 480-2) y en cementos (UNE-EN 196-3:2005+A1), se suele utilizar el Aparato de Vicat midiendo la penetración de la aguja en las mezclas. La diferencia entre ambos métodos está en el valor de referencia de penetración de la aguja, tanto para la determinación del tiempo de inicio de fraguado como la del fin de fraguado, como se puede apreciar en la *tabla 5*:

	Inicio de fraguado (distancia entre aguja y placa base)	Fin de fraguado (penetración máxima de aguja)
UNE-EN 196-3: 2005+A1. Ensayo para cementos	6 ± 3 mm.	0,5 mm.
UNE-EN 480-2. Ensayo para hormigones, morteros y pastas.	4 mm. (no figura tolerancia en la norma)	2,5 mm.

Tabla 5. Comparativa de ensayos de tiempos de fraguado.

Parece razonable pensar que en UHPFRC estos criterios deben ser reconsiderados teniendo en cuenta que cuanto mayor es la cohesión de la mezcla es previsible que, utilizando el Aparato de Vicat, sea menor la distancia entre aguja y placa base en el ensayo de inicio de fraguado y mayor la penetración máxima que limite el tiempo de fin de fraguado.

Para este trabajo se ha fijado un criterio basado en la penetración de la aguja de Vicat (fig. 62) con idéntico proceso de preparación, pero modificando los criterios de definición de tiempos y teniendo además en cuenta el ensayo de inicio de fraguado en yesos según UNE-EN 13279-2.

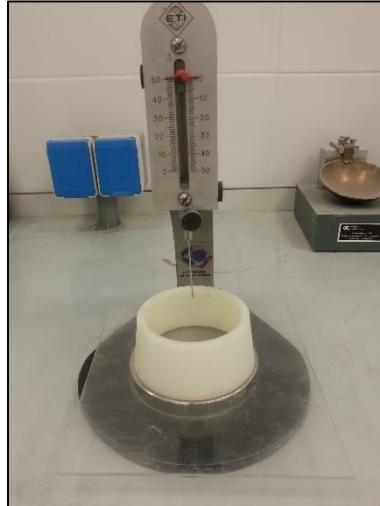


Fig. 62. Aparato de Vicat.

El momento a partir del cual la placa puede ser doblada (Inicio de Conformado) se determina a partir del aspecto del hormigón cuando la aguja sale de la probeta. El hueco que deja en ella no debe cerrarse por sí solo, porque esto significaría que el hormigón aún no ha conseguido suficiente cohesión, y la aguja no debe arrastrar material en la extracción. En caso contrario deberá esperarse y realizar medidas en intervalos de tiempo determinados hasta que la aguja aparezca prácticamente limpia (ver imágenes comparativas, fig. 63 y 64).

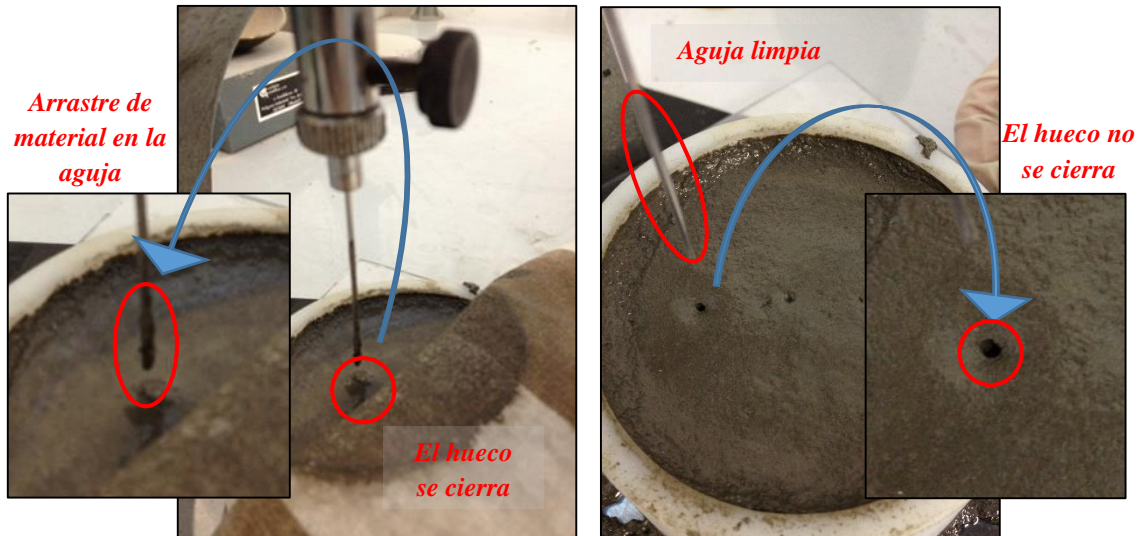


Fig. 63. La aguja arrastra demasiado material, el hueco se cierra.

Fig. 64. Aguja prácticamente limpia, el hueco no se cierra.

El momento en el que el doblado ya no es posible (Fin de Conformado) sin dañar las propiedades finales se ha definido como el momento a partir del cual se produce el agrietamiento alrededor del hueco dejado por la aguja (fig. 65), lo que indica que el endurecimiento se está iniciando y un conformado en este momento perjudicaría su respuesta posterior.

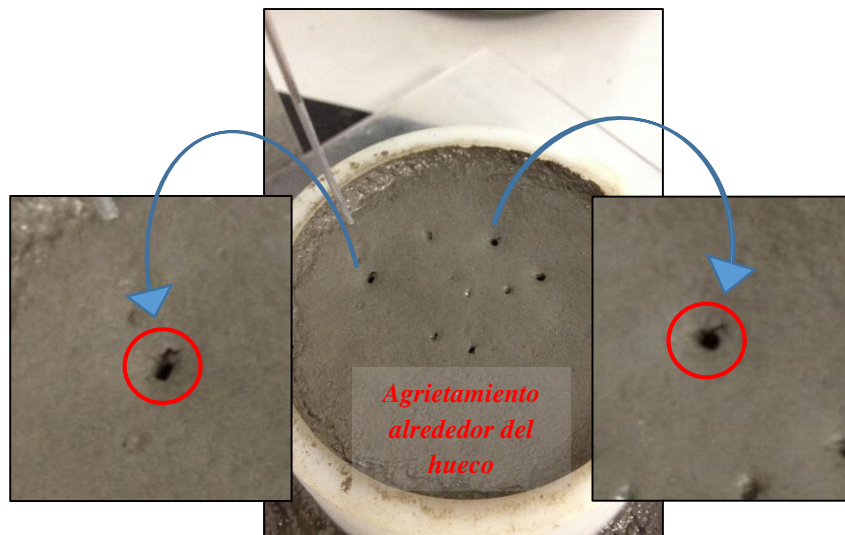


Fig. 65. Determinación de fin de conformado.

El espesor de capa de hormigón influye en gran medida en el tiempo de conformado, por lo que hay que ajustar las características del ensayo al espesor de la pieza real que se quiera fabricar. En nuestro caso, las placas fabricadas tienen un espesor de 2 cm, por lo que el espesor de hormigón colocado en el molde para su ensayo será aproximado a este.

Estos hormigones desde unos minutos después de su fabricación crean una costra superficial que puede llevar a equívocos en el tiempo de fraguado, ya que solo tiene un espesor de 2-3 mm estando el resto de capa de hormigón en estado plástico y puede llevar a falsear el dato de inicio o fin de fraguado si no lo tenemos en cuenta. Para minimizar este efecto las probetas de ensayo se mantendrán tapadas con telas húmedas hasta el momento de los ensayos y se volverán a tapar entre comprobación y comprobación.

Para comprobar si los criterios utilizados son efectivos, se realiza una prueba, en la que el hormigón es vertido en un molde rígido de dimensiones 30 x 15 x 2 cm y se mide el ángulo de elevación que es capaz de soportar sin escurrimiento, en función del tiempo transcurrido desde el momento de hormigonado.

La prueba se realizó utilizando la dosificación D2 control, sin incorporación de ningún tipo de acelerador de fraguado (fig. 66). Con los resultados representados en la figura 67 se observa que a las 2 horas y media de la fabricación se puede elevar la placa 20 grados sin escurrimiento del material. Los resultados siguen tendencias similares a los obtenidos en ensayos de penetración con aguja con muestras del mismo espesor.



Fig. 66. Prueba de pendiente.

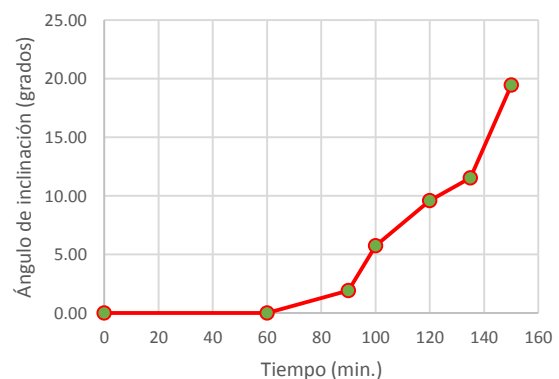


Fig. 67 Resultados prueba de pendiente

3.3.3. Resistencias en probetas.

Se fabrican 24 series de 3 probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm para su rotura a flexo-tracción y compresión simple a la edad de 3,7 y 28 días, según normas UNE-EN 14651:2007+A1 [47] y UNE-EN 12390-3 [48] respectivamente; 12 serán fabricadas con la dosificación de base D1 y las otras 12 con la dosificación de base D2. De cada grupo de 12, dos series serán control (sin acelerador) y las otras 10 llevarán alguno de los 5 aceleradores en estudio, de tal forma que existan 2 series de cada tipo diferente, obteniéndose para cada edad y hormigón 2 resultados a flexo-tracción y 4 resultados a compresión (tabla 6).

Dosificación base	Aditivo acelerador	N° serie	Probetas ensayadas					
			Resistencia flexo-tracción			Resistencia compresión		
			3 días	7 días	28 días	3 días	7 días	28 días
D1	Control (sin acelerador)	D111	1	1	1	2	2	2
		D112	1	1	1	2	2	2
	SIKA SIKASET 3	D121	1	1	1	2	2	2
		D122	1	1	1	2	2	2
	BASF X SEED 130	D131	1	1	1	2	2	2
		D132	1	1	1	2	2	2
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	D141	1	1	1	2	2	2
		D142	1	1	1	2	2	2
	GRUPO IQE AKF-63	D151	1	1	1	2	2	2
		D152	1	1	1	2	2	2
GRUPO IQE ACE-2402	D161	1	1	1	2	2	2	
	D162	1	1	1	2	2	2	
D2	Control (sin acelerador)	D211	1	1	1	2	2	2
		D212	1	1	1	2	2	2
	SIKA SIKASET 3	D221	1	1	1	2	2	2
		D222	1	1	1	2	2	2
	BASF X SEED 130	D231	1	1	1	2	2	2
		D232	1	1	1	2	2	2
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	D241	1	1	1	2	2	2
		D242	1	1	1	2	2	2
	GRUPO IQE AKF-63	D251	1	1	1	2	2	2
		D252	1	1	1	2	2	2
GRUPO IQE ACE-2402	D261	1	1	1	2	2	2	
	D262	1	1	1	2	2	2	

Tabla 6. Ensayos de resistencias realizados en probetas prismáticas. Dosificación base D1.

Las probetas se conservan en cámara húmeda y sumergidas en agua hasta el momento de su rotura (fig.68).



Fig. 68. Conservación de probetas.

3.4. Segunda fase de ensayo.

3.4.1. Fabricación de placas.

En el trabajo se pretende saber si el hecho de realizar el conformado de piezas de UHPFRC durante el periodo de tiempo definido por los ensayos descritos en el apartado anterior afecta a las propiedades finales de las placas.

El proceso de amasado de los materiales se realizará controlando los momentos en los que se añade cada uno de los ingredientes a la amasadora para mantener constantes las condiciones de fabricación.

En primer lugar se añaden al vaso de amasado las arenas, cemento, humo de sílice, harina de cuarzo y los aditivos que se utilicen en cada caso siempre que se presenten en estado sólido (superplastificante o acelerador). Comienza el amasado y 1 minuto después se añade el agua. En el caso de que todos aditivos se presenten en estado sólido se espera hasta los 5 minutos de amasado para añadir las fibras y se continúa este hasta los 10-11 minutos, que será el momento final de amasado. En caso de que uno de los aditivos fuese polvo y el otro líquido, este último se añadirá una vez hayan pasado 2 ó 3 minutos de la adición del agua y el resto del procedimiento continuaría igual. Si los dos aditivos fuesen en forma líquida se añade el superplastificante una vez hayan pasado 2 ó 3 minutos de la adición del agua y se esperan otros 2-3 minutos para la adición del acelerador. Una vez hayan transcurrido 7 ó 8 minutos del inicio del mezclado se añaden las fibras y se continua el amasado hasta un total de 12-14 minutos.

De esta manera se prepara el hormigón para la fabricación de placas con dos sistemas diferentes (fig. 69 y 70); por un lado moldeadas, en las que se utilizan moldes curvos que le aportarán la forma a la pieza y por otro mediante conformado, utilizando moldes flexibles y que se doblarán una vez vertido el hormigón en ellos y en el momento adecuado.



Fig. 69. Moldes rígidos para moldeado.



Fig. 70. Moldes flexibles para conformado.

La fabricación mediante moldeado consiste simplemente en el vertido del hormigón en el molde curvo y esperar al desmoldeo 24 horas después, obteniéndose piezas con la forma y textura similar a la del molde (fig. 71, 72, 73 y 74).

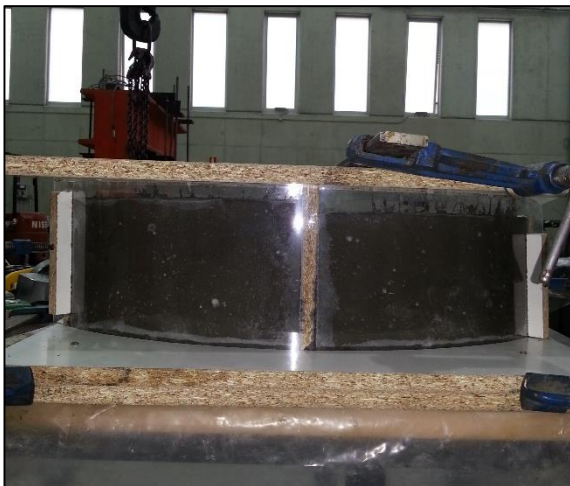


Fig. 71. Fabricación por moldeado, curvatura C1.



Fig. 72. Placa fabricada por moldeado C1.



Fig. 73. Fabricación por moldeo, curvatura C2



Fig. 74. Placa fabricada por moldeo C2

El sistema de conformado consiste en la colocación del molde flexible, en el intervalo de tiempo calculado, sobre una mesa de apoyo con la curvatura deseada, a la que se fijarán las piezas mediante gatos, para que puedan mantenerse en su posición hasta el momento del desmoldeo. Todas las placas se tapanán con telas húmedas y se colocará una lámina plástica sobre ellas para evitar que la colocación de los gatos produzca deformaciones en el ajuste (fig. 75, 76, 77, 78, 79 y 80).



Fig. 75. Vertido de hormigón en molde flexible.



Fig. 76. Placas cubiertas antes del conformado.



Fig. 77. Sistema de conformado, curvatura C1.



Fig. 78. Placa conformada, curvatura C1.



Fig. 79. Sistema de conformado, curvatura C2.

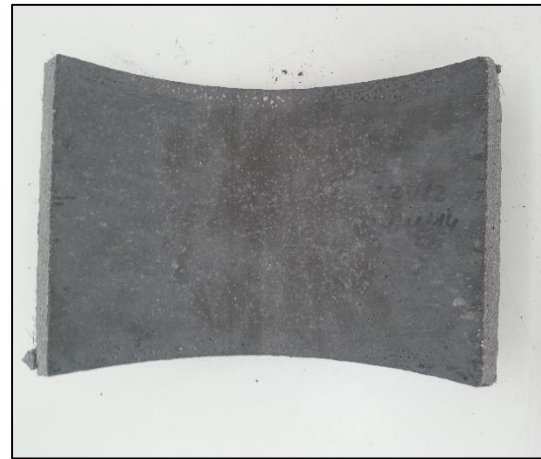


Fig. 80. Placa conformada, curvatura C2.

Todas las piezas fabricadas tienen las mismas dimensiones de 30 x 15 x 2 cm. Se fabricaron 24 piezas con un radio de curvatura de 38 cm (C1) y 24 piezas con radio de curvatura 15 cm (C2). De las 24 piezas de cada curvatura, 12 fueron fabricadas por moldeado y las otras 12 mediante conformado. De cada grupo de 12 piezas iguales, 6 se fabricaron con la dosificación control (sin acelerador de fraguado) y las otras 6 con el acelerador elegido (*tablas 7 y 8*).

Curvatura	Dosificación	Rotura	Fabricación	Nº de placa
C1	Sin acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C1D1
				C1D2
				C1D3
		Placas moldeadas	C1S1	
			C1S2	
			C1S3	
	Posición convexa	Placas conformadas	C1D4	
			C1D5	
			C1D6	
		Placas moldeadas	C1S4	
			C1S5	
			C1S6	
Con acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C1D7	
			C1D8	
			C1D9	
	Placas moldeadas	C1S7		
		C1S8		
		C1S9		
Posición convexa	Placas conformadas	C1D10		
		C1D11		
		C1D12		
Placas moldeadas	C1S10			
	C1S11			
	C1S12			

Tabla 7. Características de placas fabricadas, curvatura C1.

Curvatura	Dosificación	Rotura	Fabricación	Nº de placa
C2	Sin acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C2D1
				C2D2
				C2D3
		Placas moldeadas	C2S1	
			C2S2	
			C2S3	
	Posición convexa	Placas conformadas	C2D4	
			C2D5	
			C2D6	
		Placas moldeadas	C2S4	
			C2S5	
			C2S6	
Con acelerador de fraguado	Posición cóncava	Placas conformadas	C2D7	
			C2D8	
			C2D9	
	Placas moldeadas	C2S7		
		C2S8		
		C2S9		
Posición convexa	Placas conformadas	C2D10		
		C2D11		
		C2D12		
Placas moldeadas	C2S10			
	C2S11			
	C2S12			

Tabla 8. Características de placas fabricadas, curvatura C2.

Las placas se conservaron en cámara húmeda a 20°C y 100% de humedad hasta la fecha de ensayo a la edad de 28 días (fig. 81).



Fig. 81. Conservación de probetas en cámara húmeda.

3.4.2. Resistencias en placas.

Disponemos de 6 elementos fabricados con el mismo sistema y misma dosificación. De cada grupo de 6 placas iguales, 3 se ensayarán en posición cóncava y las otras 3 en posición convexa.

Se ensayan a flexión según norma UNE-EN 14651:2007+A1 [47] a la edad de 28 días, apoyándolas en sus extremos con una luz de 17 cm y aplicando la carga en el centro de la luz. (fig. 82 y 83).

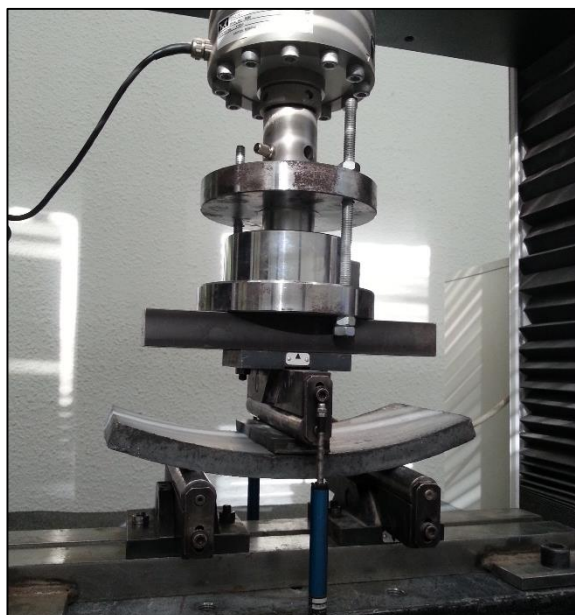


Fig. 82. Placa de serie C1, Rotura en posición cóncava.



Fig. 83. Placa de serie C2, Rotura en posición convexa.

4. Resultados.

4.1. Primera fase de ensayos.

4.1.1. Tiempos de conformado.

Con los criterios definidos en el programa experimental, se realizaron los ensayos de determinación de tiempos de conformado en hormigones sin fibras.

En las figuras 84 y 85 se muestran las comparativas de tiempos medios de conformado obtenidos partiendo de una misma dosificación base en cada figura (D1 o D2) y la adición de cada uno de los aceleradores estudiados. La dosificación control no incluye ningún tipo de acelerador de fraguado.

En la figura 86 se muestra el comportamiento en tiempos medios de inicio y fin de conformado de cada acelerador de fraguado, según se añada a una u otra dosificación base.

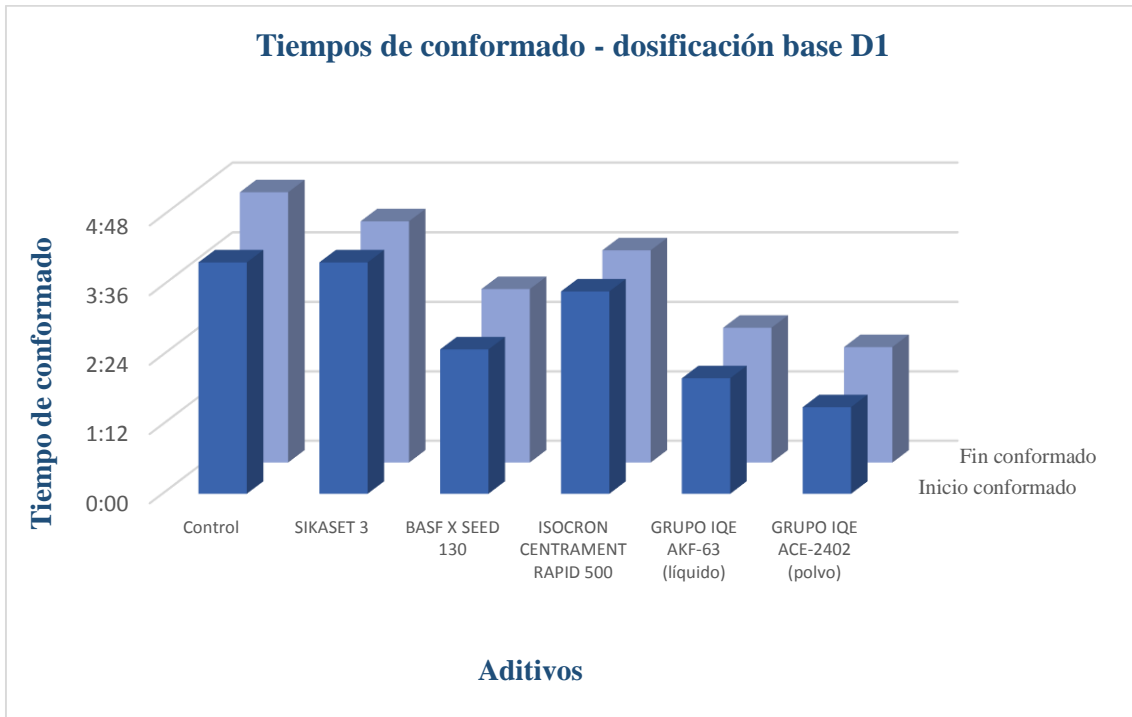


Fig. 84. Comparativa de tiempos de fraguado en dosificación base 1 según aceleradores.

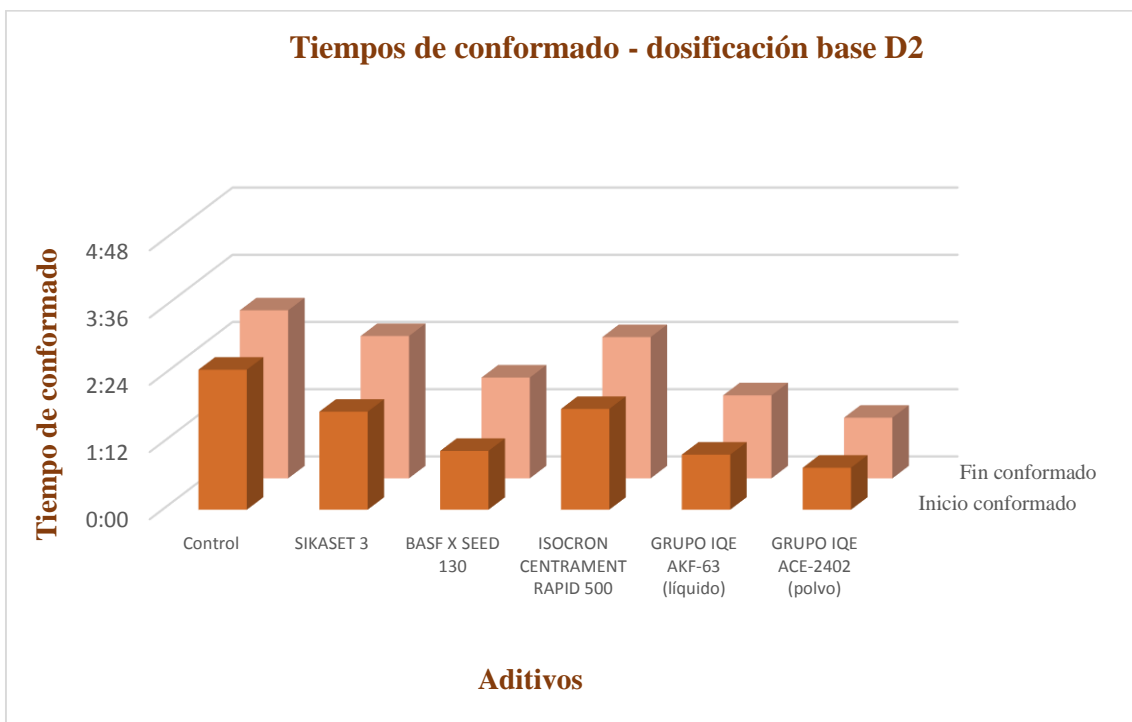


Fig. 85. Comparativa de tiempos de fraguado en dosificación base 2 según aceleradores.

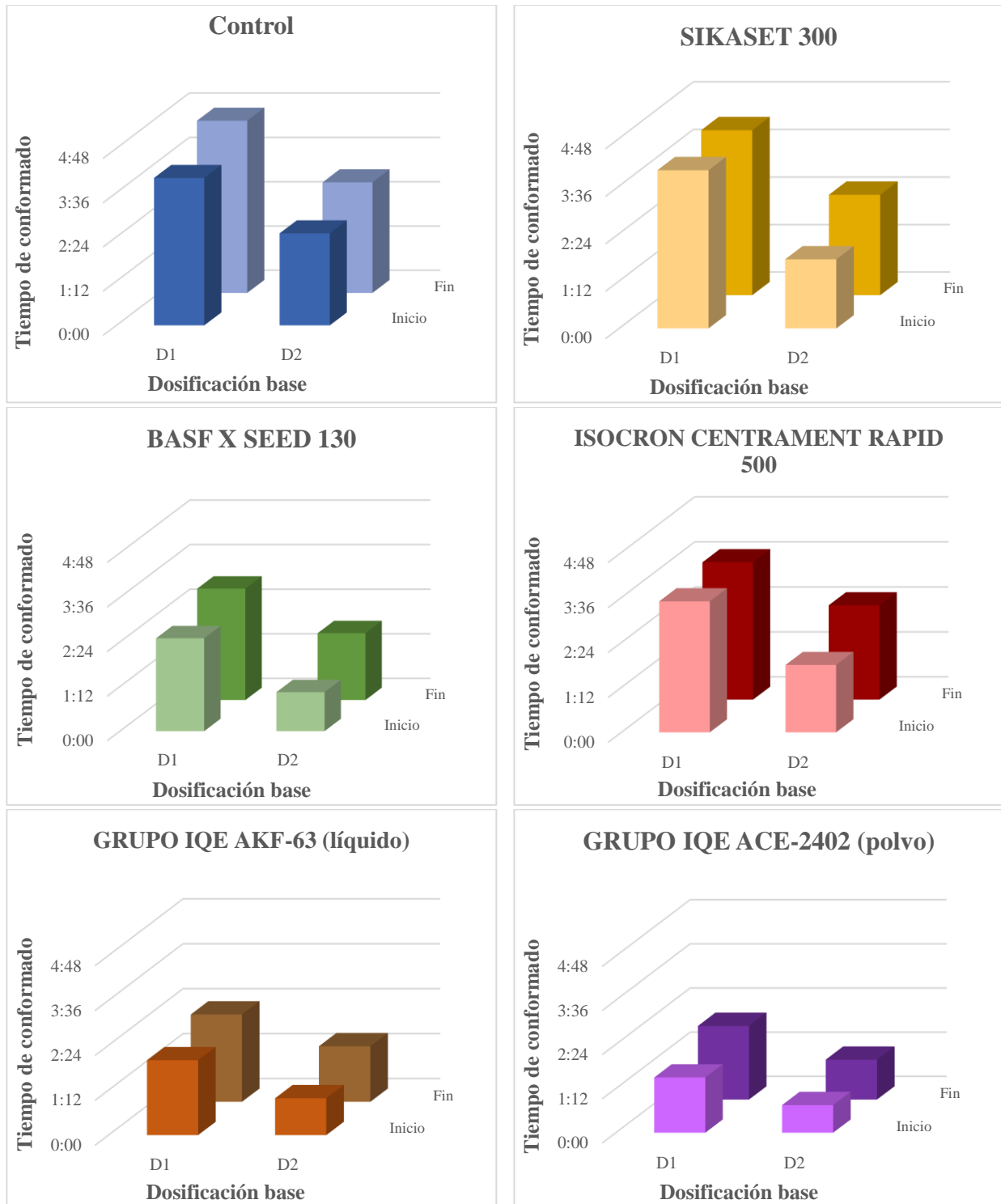


Fig. 86. Efecto de aceleradores de fraguado según dosificación base.

En las figura 84 se observa que la inclusión de aceleradores de fraguado en la dosificación D1 disminuye los tiempos de inicio y fin de conformado, manteniéndose un periodo de 30-40 minutos entre uno y otro en todos los casos. El tiempo de espera para el inicio de conformado varía desde

3 horas y 30 minutos en el caso de D1 control (sin acelerador) a 1 hora y 15 minutos en el caso de menor tiempo inicial con acelerador grupo IQE ACE-2402.

En la figura 85 observamos el mismo fenómeno con la dosificación D2 base, reduciéndose considerablemente los tiempos de conformado. En este caso los tiempos varían desde 2 horas y 15 minutos en la dosificación D2 control (sin acelerador) a 40 minutos en el caso de menor tiempo correspondiente a la dosificación con acelerador grupo IQE ACE-2402.

En la figura 86 se aprecia que los tiempos de inicio de conformado son menores en todos los casos cuando la dosificación de partida es la D2.

Los aditivos aceleradores de fraguado que proporcionan menores tiempos de inicio y fin de fraguado son los del grupo IQE, manteniéndose un margen de tiempo entre el inicio y fin de 30-45 minutos.

4.1.2. Resistencias a flexo-tracción en probetas.

En las *tablas 9 y 10* se adjuntan los resultados de resistencias medias obtenidas en ensayos de rotura a flexo-tracción en probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm con resultados a edades de 3, 7 y 28 días. En estos ensayos no se incluyen fibras metálicas.

El resultado de resistencia a flexo-tracción expresado, corresponde a la media aritmética entre cada una de las probetas ensayadas a cada edad de las 2 series fabricadas con la misma dosificación.

Dosificación base	Acelerador	Series	Resistencia media flexo-tracción (MPa)		
			3 días	7 días	28 días
D1	Control	1-2	11,30	14,86	19,60
	SIKASET 3	3-4	13,14	16,50	21,47
	BASF X SEED 130	5-6	14,67	16,81	21,09
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	7-8	12,89	13,44	23,35
	GRUPO IQE AKF-63 (líquido)	9-10	12,58	14,63	22,07
	GRUPO IQE ACE-2402 (polvo)	11-12	11,67	13,36	20,90

Tabla 9. Resistencias a flexo-tracción en probetas prismáticas, dosificación base D1.

Dosificación base	Acelerador	Series	Resistencia media flexo-tracción (MPa)		
			3 días	7 días	28 días
D2	Control	13-14	11,20	17,46	20,48
	SIKASET 3	15-16	11,23	18,61	21,84
	BASF X SEED 130	17-18	12,86	19,16	22,59
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	19-20	15,39	16,54	21,25
	GRUPO IQE AKF-63 (líquido)	21-22	13,01	15,96	22,67
	GRUPO IQE ACE-2402 (polvo)	23-24	11,78	16,75	21,56

Tabla 10. Resistencias a flexo-tracción en probetas prismáticas, dosificación base D2.

Representamos gráficamente los resultados obtenidos comparando cada una de las dosificaciones base control con cada uno de los aceleradores estudiados.

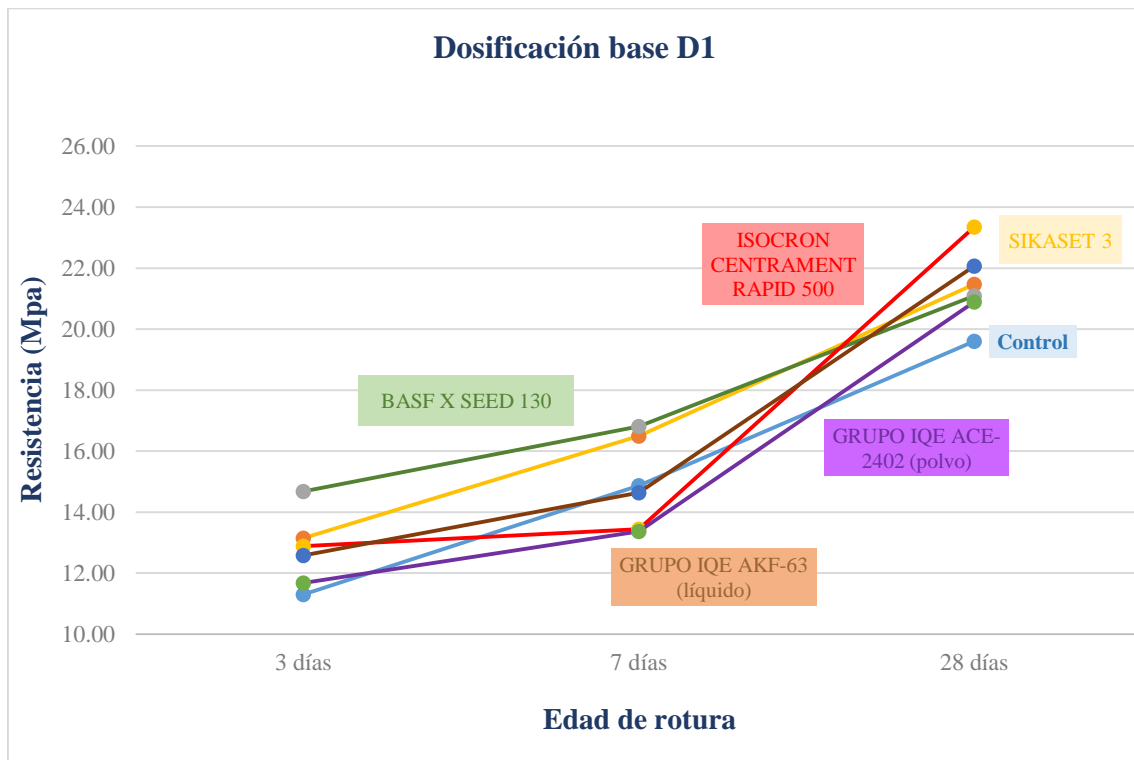


Fig. 87. Resistencias a flexo-tracción en probetas. Dosificación base D1.

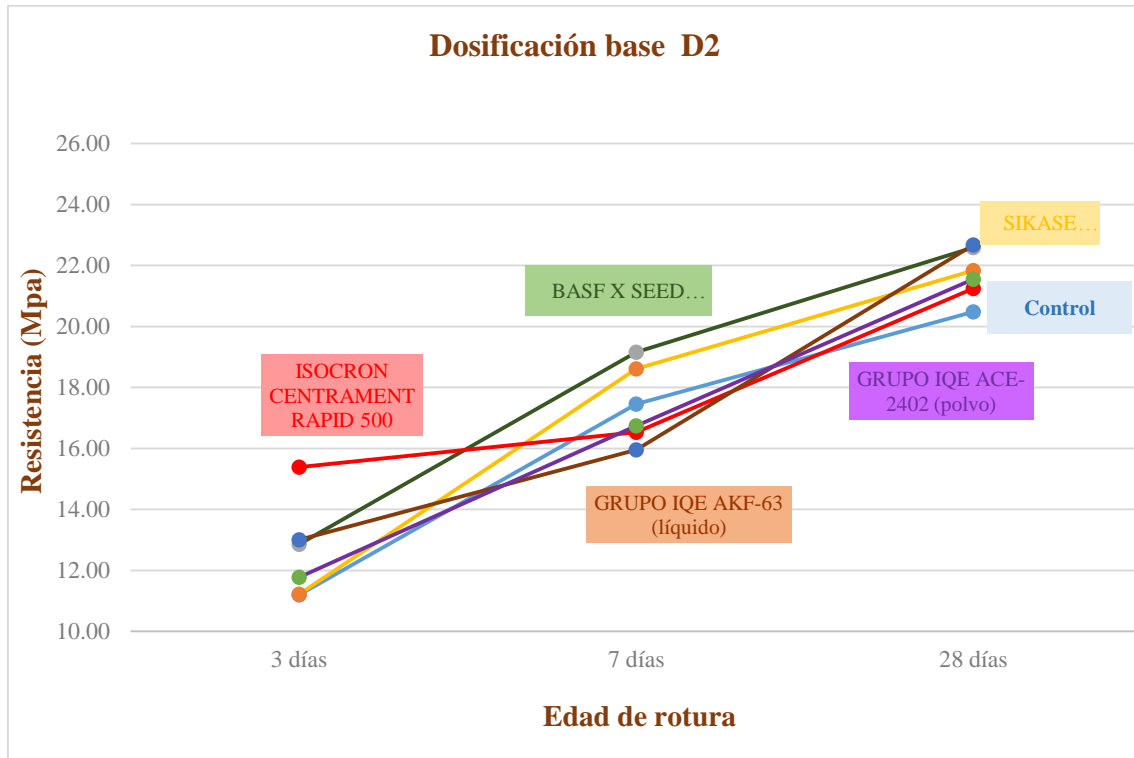


Fig. 88. Resistencias a flexo-tracción en probetas. Dosificación base D2.

Si hacemos la comparativa de resistencias obtenidas en D1 y D2 según el aditivo añadido se obtienen los resultados representados en la figura 89.



Fig. 89. Comparativa resistencias flexo-tracción según dosificación base.

Podemos observar que las resistencias a flexotracción en las dosificaciones D1 y D2 control son similares a las obtenidas introduciendo acelerantes en la mezcla.

En cuanto a la influencia en la dosificación base con respecto a los aditivos, aunque con alguno de los acelerantes se consigue algo más de resistencias según la dosificación inicial las diferencias no son importantes.

4.1.3. Resistencias a compresión simple en probetas.

Se adjunta la tabla con los resultados de las resistencias obtenidas. El resultado de resistencia a compresión simple corresponde a la media aritmética de las 2 probetas a cada edad de las 2 series fabricadas de la misma composición. Cada valor corresponde a la media de las 4 resistencias obtenidas en cada caso.

Dosificación base	Aditivo	Series	Resistencia media a compresión (MPa)		
			3 días	7 días	28 días
D1	Control	1-2	82,05	101,70	140,9
	SIKASET 3	3-4	90,23	104,67	128,6
	BASF X SEED 130	5-6	72,99	95,84	138,0
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	7-8	90,59	119,51	153,5
	GRUPO IQE AKF-63 (líquido)	9-10	86,27	112,05	138,1
	GRUPO IQE ACE-2402 (polvo)	11-12	86,56	110,70	136,9
D2	Control	13-14	92,29	105,43	134,5
	SIKASET 3	15-16	79,23	107,72	129,5
	BASF X SEED 130	17-18	83,07	103,36	134,6
	ISOCRON CENTRAMENT RAPID 500	19-20	91,57	113,24	141,9
	GRUPO IQE AKF-63 (líquido)	21-22	82,46	102,78	141,1
	GRUPO IQE ACE-2402 (polvo)	23-24	82,72	100,73	134,2

Tabla 11. Resistencias a compresión en probetas prismáticas

Representamos los resultados en las figuras 90 y 91.

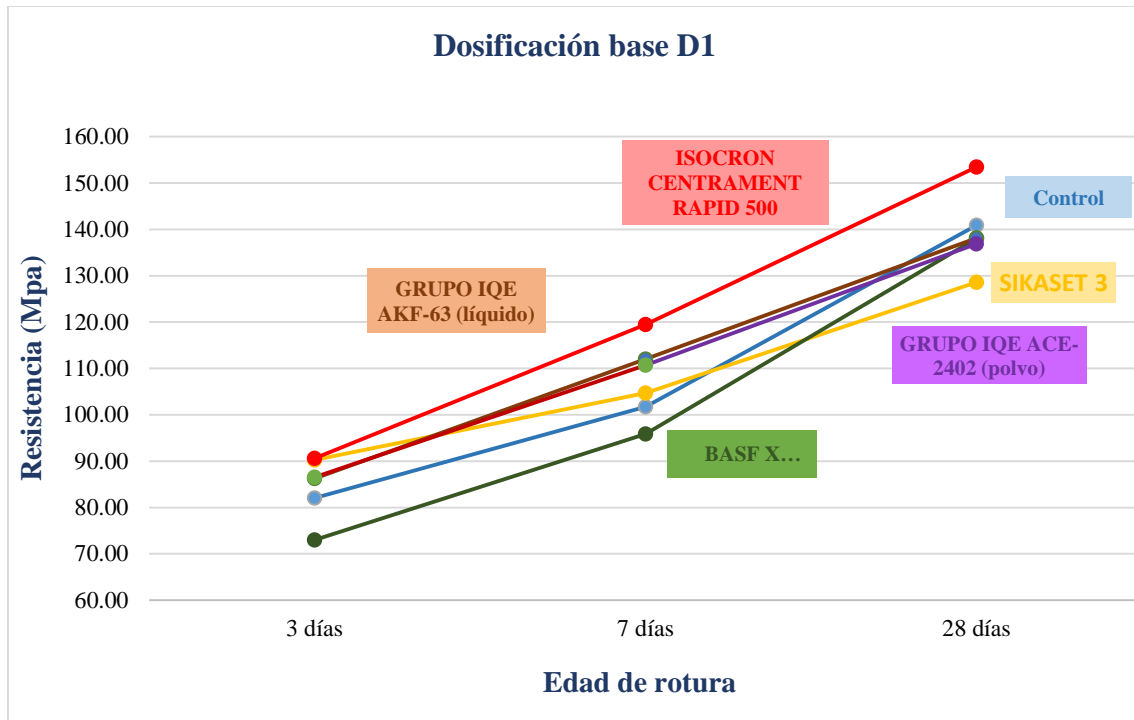


Fig. 90. Resistencias a compresión simple en probetas. Dosificación base D1.

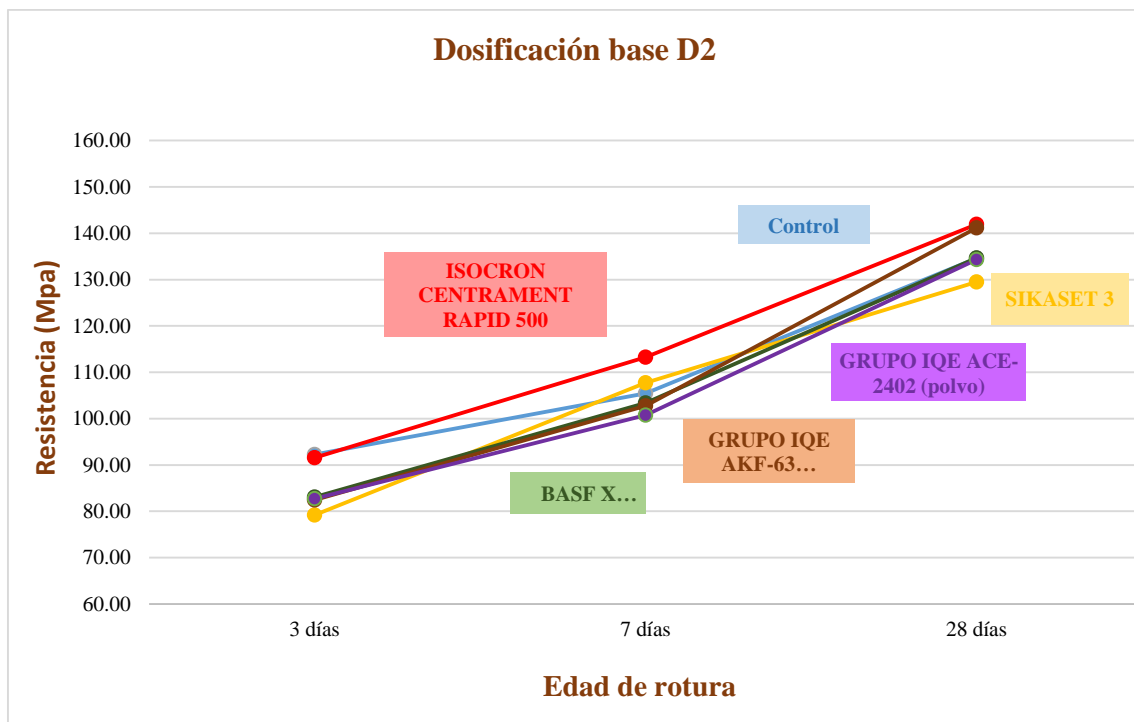


Fig. 91. Resistencias a compresión simple en probetas. Dosificación base D2.

4. Resultados

Comparamos las resistencias obtenidas con cada tipo de aditivo en función de la dosificación base (fig. 92).

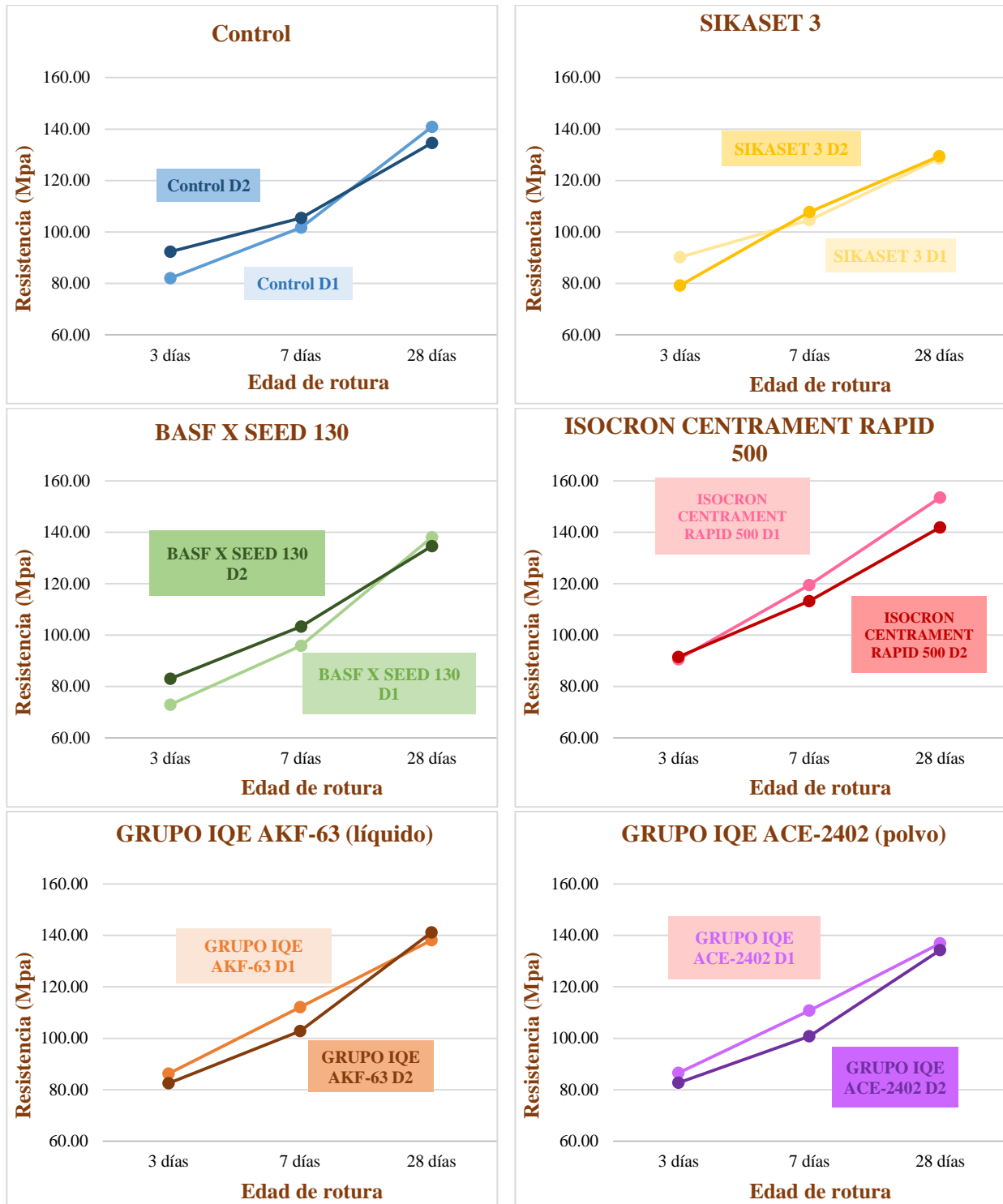


Fig. 92. Comparativa resistencias a compresión simple según dosificación base.

Con estos resultados no se aprecian diferencias significativas entre las resistencias alcanzadas con la dosificación D1 y la D2, ni entre las mezclas con aceleradores de fraguado y sin ellos.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la primera fase de ensayo, tanto de tiempos de conformado como de resistencias en probetas se decide tomar como dosificación para la fabricación de placas D2 pues los tiempos de conformado son menores que los de la D1 en todos los casos y como acelerador de fraguado ACE 2402 (grupo IQE), ya también proporciona menores tiempos para el inicio de conformado y puede favorecer para reducir periodos de espera en la fabricación y no presenta disminución apreciable en las resistencias obtenidas.

4.2.Segunda fase de ensayos.

4.2.1. Fabricación de placas.

Con la dosificación elegida en la primera fase de ensayo se procede a la fabricación de las placas, pero a partir de este momento se incluyen las fibras metálicas.

4.2.1.1. Placas conformadas.

El acabado superficial de las placas fabricadas no presenta fisuras apreciables y las dimensiones son constantes en toda su longitud. En algunos de los elementos se observan defectos puntuales debido al sistema de sujeción de los gatos durante el proceso de conformado que presionan excesivamente, en algunos casos la placa, provocando su estrechamiento en esa zona.

La textura de hormigón obtenida es capaz de imitar la del molde que lo contiene, de tal forma que las placas presentan una cara, la que estuvo en contacto con el molde con idéntico aspecto (fig. 93), mientras que la cara que superior, sobre la que se colocan las telas húmedas, tienen una textura más rugosa, similar a la de las telas (fig. 94).



Fig. 93. Cara inferior placa conformada C1.



Fig. 94. Cara superior placa conformada C1.

4.2.1.2. Placas moldeadas.

Las placas moldeadas, al contar con un sistema de fabricación mediante vertido en molde cerrado, tanto la cara superior e inferior tienen el mismo aspecto y similar al de las láminas que forman el molde. En este caso no tenemos ningún problema de dimensiones ni fisuración ya que no sufren ningún movimiento desde su fabricación hasta su desmoldeo (fig. 95 y 96).



Fig. 95. Cara inferior placa moldeada C2.

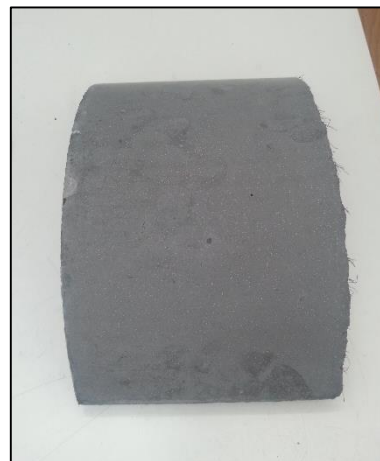


Fig. 96. Cara superior placa moldeada C2.

4.2.2. Resistencias en placas.

Con los procedimientos descritos en el apartado 3.6 se fabrican las placas definidas para su ensayo a flexión. En la *tabla 12* se adjuntan los resultados medios obtenidos, correspondientes cada valor a la media aritmética de las 3 placas de cada tipo fabricadas y ensayadas.

Curvatura	Dosificación	Posición de rotura	Fabricación	Nº de placas	Resistencia media a 28 días (MPa)
C1	Control	Cóncava	Conformadas	1-3	22,0
			Moldeadas	4-6	23,5
		Convexa	Conformadas	7-9	26,8
			Moldeadas	10-12	21,0
	Con acelerador ACE 2402 (grupo IQE),	Cóncava	Conformadas	13-15	19,0
			Moldeadas	16-18	22,6
		Convexa	Conformadas	19-21	23,4
			Moldeadas	22-24	18,9
C2	Control	Cóncava	Conformadas	25-27	18,4
			Moldeadas	28-30	18,7
		Convexa	Conformadas	31-33	13,9
			Moldeadas	34-36	10,7
	Con acelerador ACE 2402 (grupo IQE),	Cóncava	Conformadas	37-39	17,1
			Moldeadas	40-42	23,9
		Convexa	Conformadas	43-45	15,8
			Moldeadas	46-48	9,3

Tabla 12. Resistencias medias a flexo-tracción en placas, curvatura C2.

Los resultados obtenidos, comparando entre placas conformadas y no conformadas de cada curvatura y dosificación, se representan en las figuras 97 y 98.

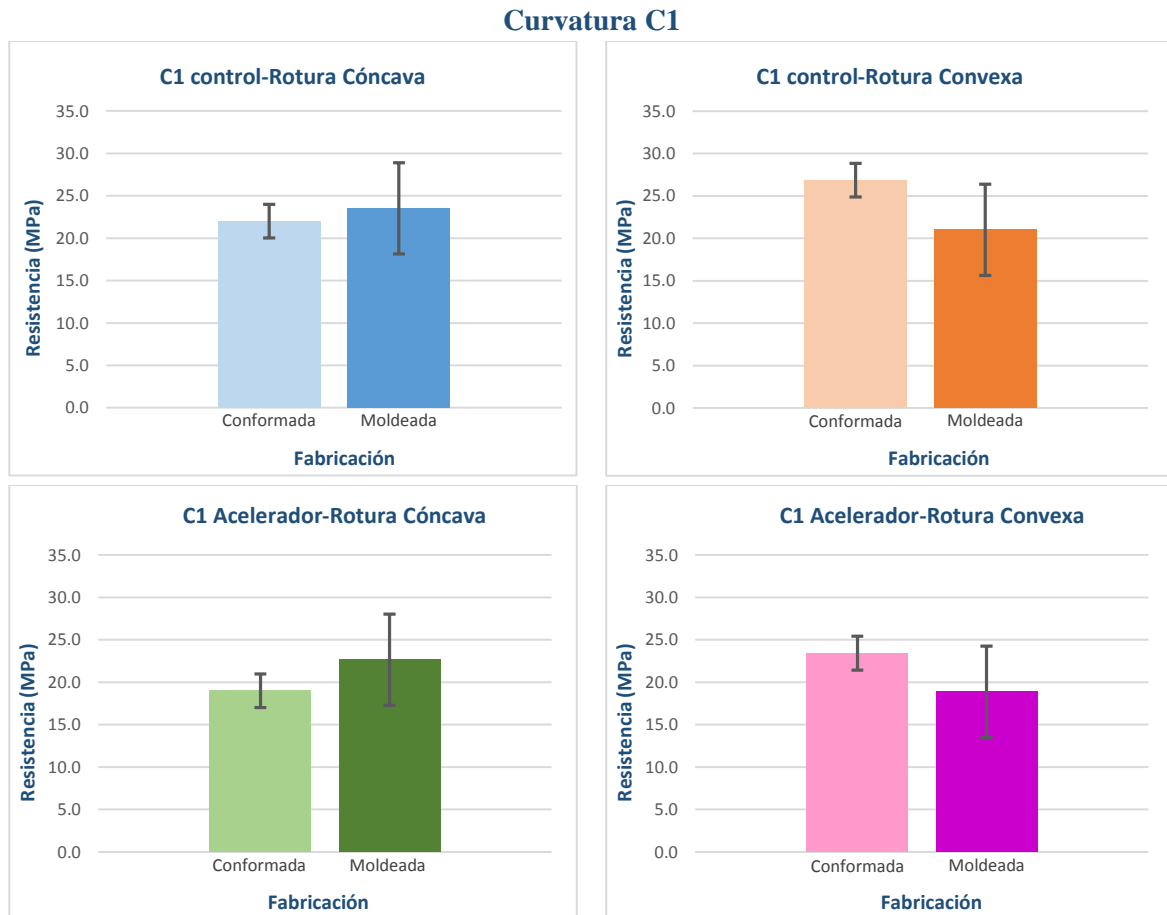


Fig. 97. Resistencia a flexo-tracción en placas. Curvatura C1.

Curvatura C2

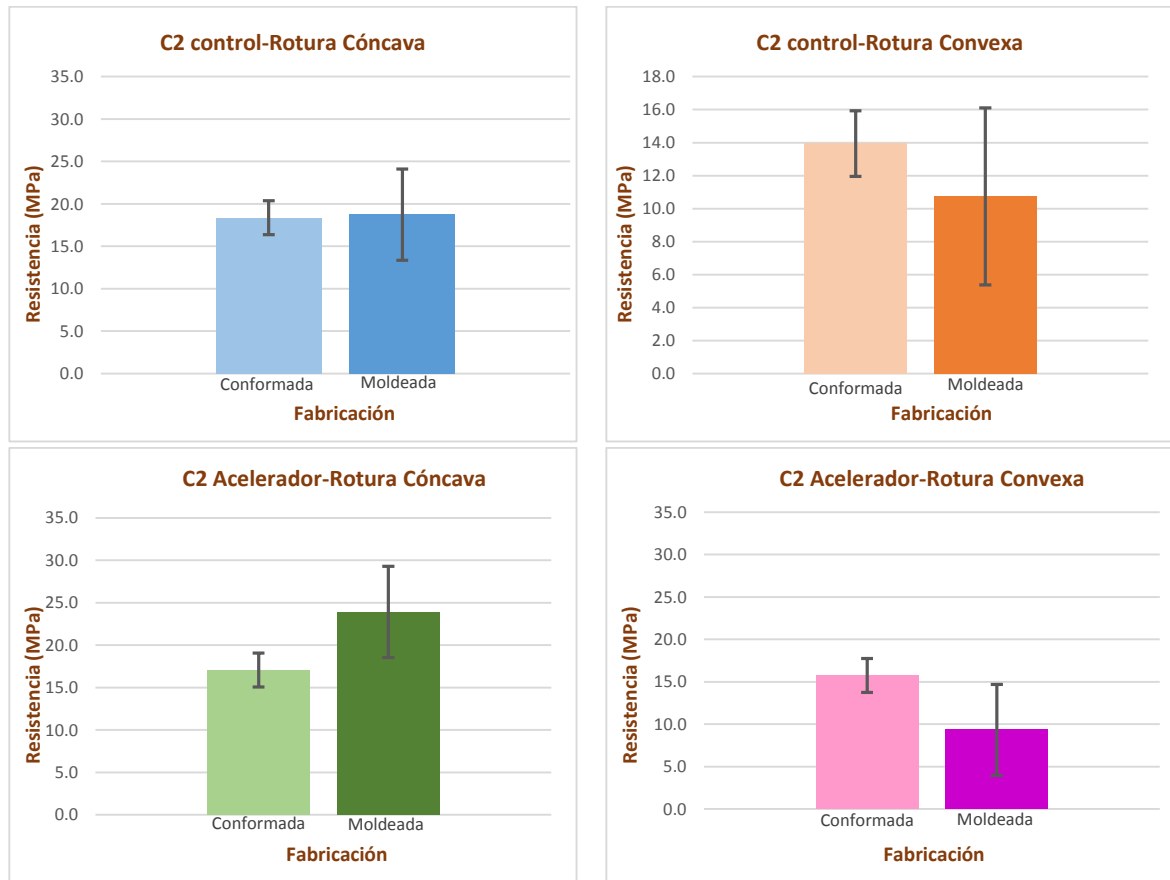


Fig. 98. Resistencia a flexo-tracción en placas. Curvatura C2

Con los datos obtenidos se observa, que en las placas moldeadas la rotura en posición cóncava es más favorable que la posición convexa, es decir, cuando no existe influencia del método de fabricación, ya que se han realizado mediante vertido en molde, las resistencias mayores se obtienen en posición cóncava.

El hecho de que en las moldeadas se consigan mejores resistencias en posición cóncava, se puede explicar debido a que en esa posición existe mayor superficie de contacto entre la placa y los rodillos de apoyo de la prensa, por lo que la adherencia entre los dos materiales es mayor y se consiguen mejores resultados.

Este fenómeno no se reproduce cuando se trata de las placas conformadas, por lo que el hecho del modo de fabricación influye en las resistencias obtenidas. Se observa que en rotura convexa, se alcanzan valores de mayor resistencia cuando la placa ha sido conformada que cuando ha sido moldeada.

Esto se podría explicar por una posible segregación en la mezcla, que provoca que las fibras al verter el hormigón en el molde flexible se hayan repartido de forma que en la parte inferior de la placa haya más cantidad, debido a que el hormigón sea más fluido de lo deseado.

De esta forma, cuando se procede a la rotura de la placa en posición cóncava, la mayor parte de las fibras estarían distribuidas en la parte superior de la placa, con lo que la parte por la que va a comenzar a fisurar tiene menos fibras.

Sin embargo, cuando la rotura es en posición convexa, posición de fabricación de todas las placas, ocurre lo contrario, la parte por la que va a comenzar a fisurar es ahora la que tiene mayor cantidad de fibras, por lo que puede soportar mayor resistencia.

Cuando las placas se fabrican mediante moldeo no ocurre este fenómeno, ya que si existe algo de segregación las fibras se distribuirían de forma distinta en el ancho de la placa, pero en el canto no se apreciaría una diferencia de concentración que afectara a los resultados de la rotura.

Esto se observa tanto en las placas C1 como C2, aunque en estas últimas existe mayor dispersión en los resultados, pudiendo deberse a que el grado de curvatura de las superficies no ofrece suficiente apoyo en los rodillos de la prensa de rotura y puede dar lugar a mayores errores de medida, mientras que en el caso de las placas C1 esto no ocurre.

5. Conclusiones.

En este trabajo se inicia la investigación sobre nuevos métodos constructivos en los que un mismo molde flexible pueda ser utilizado en fabricación de piezas de distintas formas, con la posibilidad de reutilización en diseños diferentes.

Para ello se pretende realizar el proceso de conformado del hormigón en un intervalo de tiempo determinado entre el inicio y fin de conformado.

Para conseguir este objetivo es necesario definir un ensayo efectivo para determinar el intervalo de tiempo entre el inicio y fin de conformado. Dado que este intervalo de tiempo puede llegar a ser relativamente amplio se plantea la posibilidad de utilización de aditivos aceleradores de fraguado que reduzcan los tiempos de espera.

- El proceso de conformado de piezas fabricadas en hormigón de muy altas prestaciones reforzado con fibras durante el periodo de tiempo adecuado es posible sin afectar a las propiedades finales.
- Se deben extremar las condiciones en las que el proceso se realiza, la consistencia de la mezcla puede afectar a las resistencias conseguidas.
- Las características de los moldes sobre flexibilidad y textura condicionan el grado de curvatura y tiempos de conformado.
- Los aditivos aceleradores de fraguado permiten adelantar el inicio del proceso de conformado sin penalizar la resistencia del material, manteniendo un tiempo en el que el conformado es posible de entre 30 y 60 minutos, aunque en pruebas posteriores se ha comprobado que este tiempo puede ser en algunos casos superior.

- El ensayo para la determinación de estos tiempos debe adaptarse en cada caso a los espesores reales de las piezas a fabricar pues este factor influye en gran medida variando los tiempos de inicio y fin de conformado.
- El radio de curvatura es otro factor que influye en los tiempos, de tal forma que cuanto menor sea el radio mayor será el tiempo de inicio de conformado.
- Cuando todos estos factores son controlados correctamente las piezas fabricadas presentan características aceptables para su aplicación.

6. Futuras líneas de investigación.

Este trabajo corresponde a una fase inicial de investigación que puede dar lugar a muchas líneas futuras y diversas:

- Fabricación de piezas de mayor tamaño para averiguar la influencia del peso propio del hormigón sobre el conformado.
- Utilización de moldes con distintos grados de flexibilidad y textura para conocer su influencia en el movimiento de la mezcla.
- Uso de diferentes tipos de hormigones en función de las exigencias, e inclusión de distintos tipos de fibras u hormigones textiles.
- Proceso de conformado en sentido inverso al realizado, es decir, aplicando empuje hacia arriba de los extremos de la placa para valorar su influencia.
- Colocación de contramoldes que mejoren los acabados y texturas superficiales.
- Inclusión de agentes que mejoren el proceso de autosanación de la posible fisuración que se pudiese producir en el proceso.
- Fabricación de piezas con doble curvatura y con diferentes formas que no sean simplemente las rectangulares.
- Aplicación de un proceso de vibración en la fabricación que mejore las características finales de las piezas y su tiempo de ejecución.
- Adaptación del proceso de fabricación a nivel industrial que pueda hacer rentable el sistema.

Referencias

- [1] e-architect, «Heydar Aliyev Centre Baku,» Zaha Hadid Architects, 1 July 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.e-architect.co.uk/azerbaijan/heydar-aliyev-centre-baku>. [Último acceso: 04 '3 2015].
- [2] H. Arquitectura, «Frank Gehry - Der Neuer Zollhof, Düsseldorf,» [En línea]. Available: <http://hicarquitectura.com/2014/07/aeb-22-frank-gehry-der-neuer-zollhof-dusseldorf/>. [Último acceso: 04 03 2015].
- [3] A. Domingo Cabo, L. Carlos y P. Serna Ros, «JCHYPAR. Una lámina delgada de hormigón con fibras de acero,» *En blanco II*, pp. 224-230, 2006.
- [4] C. Ingenieros, «Cubiertas de L'Oceanogràfic,» [En línea]. Disponible: <http://www.cmdingenieros.com/proyectos/puentes-y-estructuras/cubiertas-oceanografico-valencia/>. [Último acceso: 04 03 2015].
- [5] AFGC-SETRA, Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes, Interim Recommendations, France, January 2002.
- [6] P. Acker y M. Behloul, «Ductal Technology: A large spectrum of properties, a wide range of applications,» *1º International Symposium on UHPC*, vol. Kassel (Germany), pp. 11-24, September 2004.
- [7] T. Ahlbron y E. Steinber, «An Overview of UHPC Efforts through the North American Working Group,» de *Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high performance construction Materials.*, Kassel, March 7-9 2012.
- [8] J. Á. López Martínez, Adaptacion del Modelo de Comportamiento del Ultra High Performance Concrete (UPPC) para el Estudio de la Respuesta Estructural y Análisis

- Numérico de una Celosía, Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil: Universidad Politécnica de Valencia, Julio 2012.
- [9] M. C. Torrijos, «Mesoestructura, comportamiento mecánico y propiedades de transporte en hormigón,» Universidad Nacional de La Plata, Diciembre 2008.
- [10] N. Viet, M. Küchler y S. Henze, «Modulare truss construction made of ultra high performance concrete,» de *The 3rd ACF International Conference- ACF/VCA*, 2008.
- [11] L. Prudencio Jr., S. Austin, P. Jones, H. Armelin y P. Robins, «Prediction of steel fibre reinforced concrete under flexure from an inferred fibre pull-out response,» *Materials and Structures*, nº RILEM 2006, pp. 601-610, 2006.
- [12] M. A. Gabalec, «Tiempo de Fraguado del Hormigón,» de *Tesis de Becarios de Investigación*, Facultad Regional La Plata, Argentina, 2008.
- [13] F. W. Locher, W. Richartz y S. S., «Studies on the behaviour of C3A in the early stages of cement hydration,» de *Seminar on the reaction of aluminates during the setting of cement*, Eindhoven, The Netherlands, April 13-14 1977.
- [14] «Universidad de Oviedo,» [En línea]. Disponible:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>. [Último acceso: 21 Enero 2015].
- [15] M. Fernández Cánovas, «Fraguado y endurecimiento de cemento Portland,» de *Hormigón*, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección Escuelas, 2007, pp. 57-63.
- [16] AENOR, «Cemento. Parte 1: composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.,» 2011.
- [17] E. Camacho Torregrosa, «Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties,» de *Ph. D. Thesis*, Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [18] M. R. Rixom, «Agentes reductores de agua,» de *Aditivos para los hormigones*, Barcelona, Editores Técnicos Asociados S. A., 1984, pp. 7-99.
- [19] AENOR, «UNE-EN 196-3:2005+A1,» *Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.*, Noviembre 2009.
- [20] AENOR, «UNE-EN 480-2,» *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: determinación del tiempo de fraguado.*, Marzo 2007.
- [21] AENOR, «UNE 83601,» *Hormigón proyectado. Determinación del tiempo de fraguado*, Febrero 2013.
-

- [22] ASTM, «C403/C403M-08,» *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*, 2008.
- [23] N. T. GUATEMALTECA, «CONAGUANOR NTG 41017 h12,» *Método de ensayo. Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por su resistencia a la penetración.*, Marzo 2013.
- [24] AENOR, «UNE-EN 13279-2,» *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2. Métodos de ensayo.*, Mayo 2014.
- [25] R. Schipper, «A flexible mold for double curved precast concrete elements,» Delft University of Technology, 2010. [En línea]. Available: <http://homepage.tudelft.nl/6w3a0/documents/schipper2010b.pdf>.
- [26] L. Spuybroek, de *Nox: machining architecture*, London, Thames and Hudson, 2004.
- [27] F.-P. Kosche, «Schaltisch und Verfahren zur Herstellung von doppelt gekrümmten Bauteilen,» Patent DEI 9823610B4 31.03.2005, German, 2005.
- [28] H. Jansen, «Prefabricage bij blobconstructies, een civiele kijk op blobarchitectuur,» de *Master Thesis*, TU Delft, 2004.
- [29] S. Grünewald, B. Janssen, R. Schipper, K. J. Vollers y J. C. Walraven, «Deliberate deformation of concrete after casting,» de *2nd International Conference on Flexible Formworks*, Bath, 2012.
- [30] R. Schipper y B. Janssen, «Manufacturing double-curved elements in precast concrete using flexible mould-first experimental results,» de *fib Symposium*, Prague, 2011.
- [31] R. Schipper, S. Grünewald y P. Raghunath, «Rheological Parameters used for deliberate Deformation of a Flexible Mould after Casting,» de *RILEM*, Paris, 2013.
- [32] F. D. Larrard, «Why rheology matters,» *Concrete International*, vol. Vol. 8, pp. 79-81, 1999.
- [33] N. Roussel, «A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications,» *Cement and Concrete Research*, n° 36, pp. 1797-1806, 2006.
- [34] N. Roussel, G. Ovarlez, S. Garrault y C. Brumaud, «The origins of thixotropy of fresh cement pastes,» *Cement and Concrete Research*, n° 42, pp. 148-157, 2012.
- [35] R. Schipper, S. Grünewald, P. Eigenraam, P. Raghunath y M. Kok, «Optimization of the flexible mould process for the production of double-curved concrete elements,» de *Delft University of Technology, The Netherlands*, VS-A, France, 2014.

- [36] B. Janssen, «Double Curved Precast Load Bearing Concrete Elements,» de *Master's Thesis*, Delft, University of Technology, 2011.
- [37] N. Roussel y P. Coussot, «Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: from slump to spreading flow,» *Journal of Rheology*, nº 49, pp. 705-718, 2005.
- [38] C. F. Ferraris y F. D. Larrad, «Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete Cement,» *Concrete and Aggregates, CCAGDP*, nº 20, pp. 241-247, 1998.
- [39] J. E. Wallevik, «Relationship between the Bingham parameters and slump,» *Cement and Concrete Research*, nº 36, pp. 1214-1221, 2006.
- [40] N. t. Heide, «Crack healing in hydrating concrete,» de *Tesis de Máster*, Mayo 2005.
- [41] H.-W. Reinhardt y M. Jooss, «Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width,» *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 981-985, 2003.
- [42] K. v. Breugel, «Is there a market for Self-healing cement-based materials?,» de *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 2007.
- [43] S. Granger, A. Loukili, G. Pijaudier-Cabot y G. Chanvillard, «Mechanical characterization of the self-healing effect of cracks in Ultra High Performance Concrete (UHPC),» University de Nantes, CNRS, St. Quentin Fallavier-France, 2005.
- [44] M. Roig y P. Serna, «Caracterización del efecto de un aditivo cristalino en la capacidad de autosanación de un hormigón. Aplicación práctica en dos intervenciones en el auditorio de Cartagena (Murcia),» de *Proyecto final de carrera*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia., 2013.
- [45] Toyota, «You Tube,» [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=qhjAg24Dwy0>. [Último acceso: 27 febrero 2015].
- [46] AENOR, «UNE-EN 1015-3,» *Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: determinación de la consistencia del mortero fresco.*, 2000.
- [47] AENOR, «UNE-EN 14651:2007+A1,» *Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión.*, 2008.
- [48] AENOR, «UNE-EN 12390-3,» *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.*, 2009.

