

Diseño de hormigón para impresión en 3D

Raquel Torres Remón

Autor: RAQUEL TORRES REMÓN		Fecha: ABRIL 2016
Título: DISEÑO DE HORMIGÓN PARA IMPRESIÓN EN 3D		
Directores del trabajo: PEDRO SERNA ROS ESTER GIMÉNEZ	Código:	Nº Páginas: 83
Departamento: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL		
Universidad: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		
Palabras clave: Trabajabilidad, Fraguado, Resistencias, Aceleradores de fraguado, Impresión 3D, Hormigón		
Código Unesco: 3305/05 Ciencias tecnológicas/ Tecnología de la construcción/ Tecnología del Hormigón		

Agradecimientos

Por el presente proyecto, quiero agradecer por toda la ayuda facilitada a todo el equipo de trabajo de la línea de investigación de UHPC del ICTECH de la Universidad Politécnica de Valencia.

En primer lugar a mis tutores Pedro Serna y Ester Giménez por todo lo que me han enseñado, ayudado y animado a seguir adelante confiando plenamente en mí, no solo durante la elaboración del proyecto si no también durante el tiempo que he estado cursando el Máster de Ingeniería del Hormigón. Agradecer a Juan Ángel López y a Marta Roig por sus consejos y su apoyo en los momentos más difíciles, a los técnicos del laboratorio por el trabajo que realizan día a día y por la ayuda que prestan a todos y cada uno de los que convivimos en el laboratorio. También a todos los compañeros del máster con los que he podido compartir esta gran experiencia pero en especial a Itziar, Fernando, Manu, Víctor y Andrea, ya que sin ellos hubiera sido muy complicado.

Por último, a toda mi familia, especialmente a mis padres y a Dani, que me apoyan y me animan en todos los momentos de mi vida.

Muchas gracias a todos.

Contenido

Agradecimientos	2
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Justificación	5
1.2. Objetivos	8
1.3. Estructura del documento.....	9
2. ESTADO DEL ARTE	10
2.1. Introducción	10
2.2. Hormigón proyectado o “Shotcrete”	10
2.2.1. Reseña histórica	11
2.2.2. Métodos	12
2.2.3. Composición de la mezcla	13
2.2.4. Aplicaciones.....	13
2.2.5. Normativa.....	14
2.3. Hormigones especiales.....	14
2.3.1. Hormigón de muy altas prestaciones con fibras (UHPRC)	15
2.3.1.1. Reseña histórica	15
2.3.1.2. Composición de la mezcla	16
2.3.1.3. Aplicaciones.....	16
2.3.1.4. Normativa.....	17
2.3.2. Hormigón compuesto por mortero de cemento reforzado con fibras de vidrio alcali-resistente (GRC/GFRC).	17
2.3.2.1. Reseña histórica	17
2.3.2.2. Métodos	18
2.3.2.3. Composición de la mezcla	19
2.3.2.4. Aplicaciones.....	19
2.3.2.5. Normativa.....	20
2.4. Fabricación aditiva. Impresión en 3D.....	22
2.4.1. Introducción y reseña histórica.....	22
2.4.2. Fases	23
2.4.2. Métodos y nuevas tecnologías.....	24
2.4.3. Características de las mezclas	29
2.4.4. Ventajas e inconvenientes	30
2.5. Proceso de fraguado del cemento portland	31
2.5.1. Composición del clinker del cemento Portland	31

2.5.1. Hidratación	32
2.5.1.1. Etapas de la hidratación	33
2.5.1.2. Factores influyentes en el fraguado del hormigón	34
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	38
3.1. Materiales utilizados	38
3.2. Moldes y equipos	41
3.3. Metodología	44
3.4. Programa experimental.....	48
3.4.1. Fase 1: Elección acelerador de fraguado.....	48
3.4.1.1. Determinación del tiempo de fraguado.....	48
3.4.2. Fase 2: Elección de la dosificación y porcentaje de acelerador de fraguado.....	48
3.4.2.1. Evolución de la trabajabilidad	49
3.4.2.2. Evolución de las resistencias	49
3.4.3. Fase 3: Intervalo de actuación del acelerador de fraguado.....	50
3.4.3.1. Evolución de la trabajabilidad	50
3.4.3.2. Evolución de las resistencias	51
3.4.3.3. Tiempo de mezclado del acelerador de fraguado.....	51
3.4.4. Fase 4: Incorporación de fibras.	52
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1. Fase 1: Elección acelerador de fraguado según los tiempos de inicio de fraguado.	53
4.2. Fase 2: Elección de la dosificación y porcentaje de acelerador de fraguado según la consistencia y las resistencias.	55
4.2.1. Resultados de trabajabilidad.....	56
4.2.2. Resultados de resistencias a corto y largo plazo.....	58
4.3. Fase 3: Intervalo de actuación del acelerador de fraguado.....	68
4.3.1. Resultados de consistencia y trabajabilidad	68
4.3.2. Resultados de resistencias a corto y largo plazo.....	70
4.3.3. Resultados sobre el tiempo de mezclado del acelerador de fraguado.....	72
4.4. Fase 4: Incorporación de fibras.....	75
5. CONCLUSIONES	79
6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

El hormigón armado ha sido, es y posiblemente continuará siendo el material por excelencia en la industria de la construcción y la arquitectura. Esto, es debido a las ventajas que presenta (adaptabilidad de forma, versatilidad y rentabilidad) frente a otros materiales desarrollados para el mismo fin.

Al comparar la industria de la construcción con otras industrias surgidas de la revolución industrial, hay que señalar que la construcción de estructuras con hormigón armado se ha realizado de una manera tradicional en fases semejantes (replanteo, encofrado, armado, hormigonado y curado, entre otras), de forma conservadora y con cierta inercia en contra de la innovación.

Tradicionalmente, la puesta en obra del hormigón armado ha sido manual, con los riesgos que conlleva este hecho, y la composición del material ha sufrido algunas modificaciones, como indican *R.A. Buswell et al* [1][2] y *Lim et al* [3].

Desde los inicios, el hormigón como material de construcción, ha experimentado cambios en algunos aspectos de su puesta en obra convencional y de su composición, desarrollándose así técnicas que han supuesto una gran evolución en la tecnología del material, y tras esta evolución han habido cambios en la industria de la construcción, aumentando así las ventajas y aplicaciones de este campo.

Por un lado, hay que señalar el desarrollo de la técnica de la proyección también denominada "Shotcrete", que ha supuesto una gran evolución en la industria constructiva, presentado grandes ventajas frente a la puesta en obra convencional, ampliando así el campo de aplicaciones. Pero este gran avance, ha sido posible gracias a la incorporación de aditivos en las mezclas, los cuales también han evolucionado notablemente.

Las aplicaciones más significativas de la técnica de la proyección son las obras subterráneas, es decir, la construcción de túneles y el empleo en la minería, aunque en la actualidad es un método muy extendido y con gran variedad de aplicaciones, debidas a las ventajas que presenta.

Uno de los ejemplos más significativos de esta técnica y que supuso un gran impulso en el desarrollo y uso de la proyección fue el nuevo método Austriaco "New Austrian Tunnelling method" (NATM), también conocido como "Sequential Excavation Method" (SEM), como cuenta *M.Karakus et al.*[4].

Por otro lado, las diferentes modificaciones en las dosificaciones de hormigón y la incorporación de otros materiales (fibras, aceleradores de fraguado, súper plastificantes) a las mezclas, también han supuesto mejoras en las prestaciones del material. Por ejemplo, la incorporación de fibras, de diferente y variada naturaleza, a las mezclas de hormigón que tiene como principal objetivo obtener ciertas propiedades para mejorar la calidad del producto final, reforzando de este modo materiales tradicionales como es el hormigón, tal como indica *Alfonso J. Morano Rodríguez et al* [5].

Tres materiales distintos que incorporan fibras además de combinar otras tecnologías son:

- Hormigón proyectado con fibras, nombrado anteriormente.
- Los hormigones de muy altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC).
- Las piezas de hormigón prefabricado GRC (Cemento reforzado con fibra de vidrio).

Por todo esto, tras conocer de forma general el avance de las técnicas en la industria de la construcción, se puede establecer una comparación significativa entre la evolución de esta industria y otras industrias surgidas de la revolución industrial, como por ejemplo la automotriz y aeroespacial. Éstas, han evolucionado sin apenas limitaciones, pero en el campo de la arquitectura y la construcción, este desarrollo ha sido distinto por las peculiaridades que plantea la actividad constructiva y por los diferentes factores de los que depende.

Muchas industrias, han desarrollado gran variedad de técnicas de robótica y de diseño de piezas con *softwares* como CAD (Computer-Aided Design o Diseño Asistido por Ordenador), CAM (Computer-Aided Manufacturing o Fabricación Asistida por Ordenador), CNC (Computer Numerical Control o Control Numérico Computarizado) y CATIA (Computer-Aided Three dimensional Interactive Application), que han utilizado para la posterior producción de piezas. Estas industrias destacan por la gran evolución que suponen algunos procesos, como la denominada "Fabricación Aditiva", o *Rapid Manufacturing, Rapid Prototyping, Solid Freeform Fabrication y Additive Manufacturing Technologies*, que consisten en la producción directa de componentes por la adición de material, para formar un objeto o pieza para uso final directo [1][2][3], a través de algunos de los softwares comentados.

Un ejemplo actual de este tipo de fabricación es la denominada impresión en 3D, orientada de forma generalizada, a la fabricación de materiales plásticos, concretamente desarrollados en este tipo de industrias.

En el campo de la arquitectura y la construcción, el empleo de *softwares*, mencionados anteriormente y utilizados en el resto de industrias, ya han sido y siguen siendo utilizados de forma generalizada, para definir la forma de la estructura, agilizando así el proceso constructivo desde la fase de proyecto.

Un claro ejemplo de ello es el Museo Guggenheim de Bilbao (1997), obra del arquitecto canadiense Frank O. Gehry, que utilizó el software CATIA, facilitando la construcción mediante las finas planchas de titanio [1], como muestra la imagen 1.



Imagen 1. Museo Guggenheim (Bilbao). Fuente: recursos electrónicos.

En lo que se refiere a la fabricación aditiva de piezas, concretamente a la impresión en 3D con hormigón, la industria de la construcción y de la arquitectura, se encuentra actualmente en fase preliminar, aunque ya existen algunas empresas como D-Shape, Contour-Crafting [6] y Concrete Printing, estudiadas por algunos investigadores como S.Lim et al. [3], que desarrollan elementos de hormigón a gran escala, de forma extrusionada o utilizando impresoras 3D, como puede verse en los ejemplos de la imagen 2 [3].

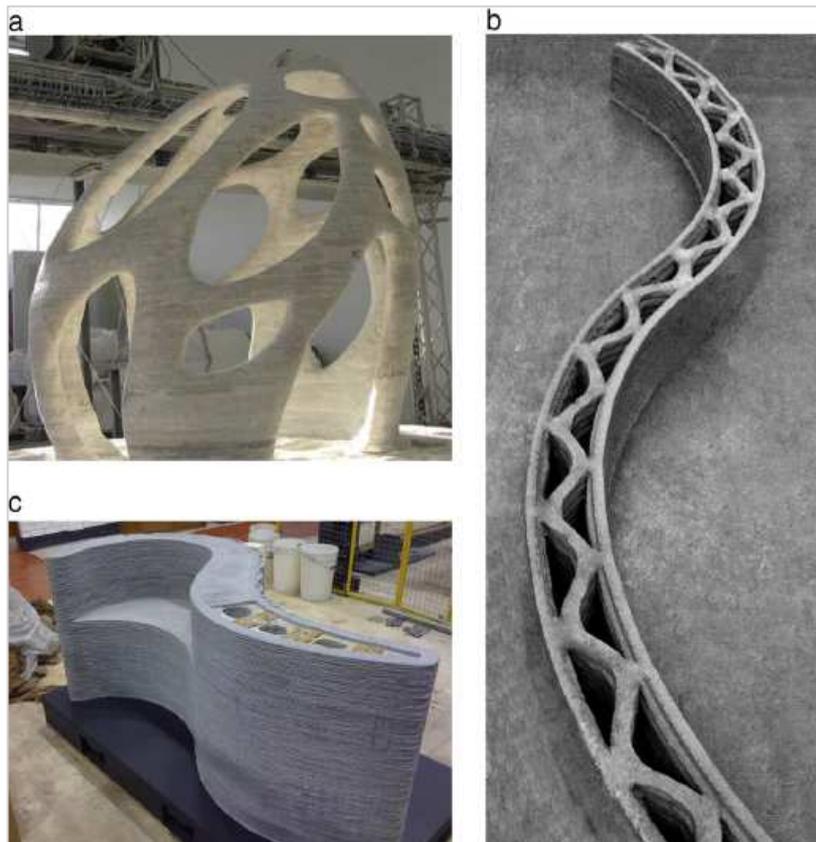


Imagen 2: figura a, empresa D-Shape; figura b, empresa Contour Crafting; figura c, empresa Concrete Printing.
Fuente: [3].

Se trata, por lo tanto, de un sistema novedoso en la construcción que podría llegar a plantear múltiples ventajas, las cuales pueden ser:

- La libertad geométrica del diseño, con pocas restricciones espaciales, a diferencia de las técnicas llevadas a cabo de forma tradicional.
- La rapidez, automatización y consecuente optimización del proceso.
- La independencia de la mano de obra humana durante la ejecución, que reduce los costes y riesgos laborales.
- La no utilización de moldes o encofrados, reduciendo material y como consecuencia coste.

A pesar de todas estas ventajas y del creciente desarrollo que se está llevando a cabo con la construcción de piezas e incluso edificios por parte de las empresas ya mencionadas, los métodos propuestos y desarrollados en la actualidad muestran algunas deficiencias, posiblemente justificadas por ser una tecnología diseñada principalmente para su utilización en otras industrias (impresión de materiales plásticos y poliméricos). Además, la dificultad de incorporar armaduras es una limitación de la técnica que está en proceso de resolución.

Por todo ello, es imprescindible encontrar una mezcla adecuada, incorporando materiales que suplan las deficiencias tras la dificultad de incorporar armaduras, que asegure la conexión entre las distintas capas generadas y que garantice resistencia y durabilidad, es decir, diseñar una mezcla apta, que se adapte a esta nueva tecnología en la industria constructiva.

Por ello, se van a estudiar algunas de las técnicas llevadas a cabo durante el último siglo, (hormigón proyectado (con y sin fibras), UHPFRC y GRC), que pueden presentar algunas similitudes en las composiciones de las mezclas y la técnica con la impresión en 3D.

La impresión de hormigón en 3D, supone la construcción de elementos de hormigón mediante la consecución de varias capas, utilizando una puesta en obra que podría ser similar a la proyección, con la posibilidad de adicionar fibras.

Esto, podría mejorar la sostenibilidad del hormigón, haciendo que este material tan ampliamente utilizado, sea cada día más respetuoso con su entorno, presentando de este modo, numerosas ventajas en cuanto a la durabilidad, seguridad y costes, como son:

- Aumento de la durabilidad, propiciado por el incremento de la compacidad y la disminución de la porosidad del hormigón.
- Reducción en la cuantía de armadura de los elementos estructurales proyectados, debido a la presencia de fibras, colocándose exclusivamente lo necesario, por la imposibilidad de colocación de armaduras.
- Reducción de los costes económicos de fabricación con una disminución de la huella de carbono durante toda la fase de construcción.
- Adaptabilidad de la forma casi ilimitada, por la colocación del molde o encofrado en una sola cara o incluso sin encofrado.

1.2. Objetivos

Objetivo general

El principal objetivo que se pretende conseguir es el desarrollo de dosificaciones de hormigón con características especiales que puedan utilizarse para proyectar, así como para imprimir en 3D con las nuevas técnicas que se desarrollan.

Objetivos específicos

- Diseñar mezclas de hormigón con la dosificación adecuada para que puedan ser proyectables.
- Diseñar mezclas de hormigón de altas resistencias, a corto y a largo plazo, siendo las resistencias a edades tempranas el principal objetivo.
- Obtener tiempos de fraguado ultrarrápidos, así como mezclas fluidas y trabajables, con la posibilidad de incorporar fibras.

Para conseguir todo esto es necesaria la incorporación de aditivos aceleradores de fraguado y súper plastificantes, así como un estudio detallado de las mezclas.

1.3. Estructura del documento

Este proyecto se divide en siete capítulos. El primer capítulo es el presente, en el que se expone la justificación, los objetivos generales y la estructura del trabajo.

El segundo capítulo responde al estado del arte, donde se presenta información general, historia, aplicaciones, así como características de las mezclas de las diferentes tecnologías o materiales especiales ya comentados y en proceso de desarrollo en la actualidad y que como ya se ha explicado en la justificación del presente apartado, están relacionados de forma directa con la nueva técnica de fabricación aditiva, la impresión de hormigón en 3D. También, se explicará el proceso de fraguado del cemento Portland, aspecto muy importante para la elaboración de las mezclas.

El tercer capítulo explica el procedimiento experimental seguido, describiendo los materiales, equipos, la metodología y el programa experimental con las diferentes fases y variables que intervienen en el desarrollo experimental.

El cuarto capítulo describe los resultados y discusión obtenidos tras el desarrollo de cada una de las fases del programa experimental, explicadas en el tercer capítulo.

El quinto capítulo responde a las conclusiones finales, obtenidas a partir de los resultados descritos en el cuarto capítulo.

El sexto capítulo muestra las futuras líneas de investigación.

El séptimo capítulo responde a las referencias bibliográficas utilizadas para la redacción del presente proyecto.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

Durante el último siglo y sobre todo durante las últimas décadas, la visión tradicional del hormigón, material por excelencia en el campo de la construcción, ha cambiado debido al desarrollo de nuevas técnicas y diferentes tecnologías.

La proyección de hormigón ha supuesto un gran avance en la puesta en obra del material, evolucionando de forma muy significativa, por el desarrollo de los aceleradores de fraguado y súper plastificantes y por la mejora de la maquinaria necesaria para llevar a cabo esta técnica.

La unión de diferentes tecnologías en el mismo material y la incorporación de otros materiales, como fibras, al hormigón hacen que éste aumente y mejore ciertas propiedades. Es así como surgen diferentes materiales compuestos especiales como son el hormigón de muy altas prestaciones con fibras (UHPFRC) y el hormigón compuesto por mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio álcali-resistente (GRC).

La unión de varias técnicas y tecnologías ha hecho que la industria de la construcción avance de forma significativa, hasta llegar a desarrollar en la actualidad, técnicas de fabricación aditiva, como es la impresión de hormigón en 3D.

Esta nueva técnica, evolucionada en muchas otras industrias, es en el campo de la construcción una tecnología novedosa.

Por todo ello, es imprescindible dar en este capítulo, una visión general de estas tecnologías y recientes técnicas, desde su historia y evolución hasta la actualidad más próxima, con aquellas empresas que ya desarrollan la denominada fabricación aditiva.

2.2. Hormigón proyectado o “Shotcrete”

El hormigón proyectado, también denominado “Shotcrete” es, según el ACI (American Concrete Institute) [7], mortero u hormigón neumáticamente proyectado a alta velocidad en una superficie.

Tradicionalmente es una mezcla de cemento, áridos y agua proyectada a través de una boquilla, para producir una masa densa y homogénea [8] sobre superficies de diferente naturaleza. La normativa española [9] clasifica las mezclas proyectadas en hormigón proyectado y mortero proyectado.

Según esta norma, el hormigón proyectado es aquel cuyo tamaño máximo de árido es superior a 8 mm, mientras que, el tamaño máximo del mortero proyectado (también denominado gunita), puede llegar hasta 8 mm, siendo ambos aplicados con una máquina se proyecta a gran velocidad sobre una superficie a través de una manguera y boquilla.

Para consolidar la mezcla, se puede reforzar la superficie con una malla de acero para posteriormente proyectar o también adicionar fibras a las mezclas, denominándose en este caso, hormigón proyectado con fibras o SFC (Sprayed Fibre Concrete).

2.2.1. Reseña histórica

El origen de la técnica de proyección, también denominada gunita en sus inicios, se remonta a finales del siglo XIX y principios del XX. El lugar donde se desarrolló dicha técnica se sitúa en el norte de los Estados Unidos, en Pensilvania, concretamente en Allentown [10]. En 1907, Carl E. Akeley inventó la primera máquina de hormigón proyectado o gunita, introduciéndola en 1910 en “The Cement Show” en Nueva York y con ello en el mercado de la construcción, al ser registrada la patente por parte de la “Cement Gun Company” de los Estados Unidos, con el nombre de gunita en 1911.

Pero son dos hechos los que motivan al inventor a desarrollar esta nueva tecnología. En primer lugar, en 1895, Carl E. Akeley (escultor y naturalista del Museo Americano de Historia Natural de Chicago), buscaba una forma de crear modelos de animales prehistóricos aplicando mezclas de arcillas, yesos y morteros de cemento sobre matrices de esqueletos para formar figuras de animales. En segundo lugar, el gran interés de ese momento por parte de la población en utilizar métodos de construcción con hormigón y cemento.

Esta primera máquina, permitía por medio de aire comprimido, pulverizar la mezcla, transportando desde un depósito la mezcla seca (cemento y arena) a través de una manguera que finalizaba con una boquilla, en la cual se incorporaba el agua. A este método se le denominó vía seca y fue el método empleado hasta el desarrollo de la vía húmeda (aproximadamente a mediados del siglo XX). La imagen 3 muestra un ejemplo de una máquina tradicional propia de esa época [11].



Imagen 3: Máquina tradicional de gunita. Fuente: [11]

La técnica tuvo gran aceptación y desarrollo por las ventajas que presentaba, teniendo en 1922 un alcance global, llegando así a Europa, concretamente a Alemania.

Durante las siguientes décadas (1920, 1930 y 1940) se utilizó la técnica de proyección en centenares de obras por todo el mundo, existiendo en 1950 alrededor de 5000 máquinas de gunita distribuidas por 120 países [10].

Entre 1939 y 1945 explota la Segunda Guerra Mundial que supone un periodo de crisis en todos los ámbitos de la vida que se prolongó hasta aproximadamente 1955-1960.

A partir de este momento (1955-1960), surge un nuevo método para proyectar, la denominada vía húmeda, que tuvo gran desarrollo siendo en la actualidad el método más extendido por el mundo como muestra la tabla 1[11].

Country/region	Dry %	Wet %	m ³ /year	Tendency
Australasia	0	100	> 50,000	wet
Italy	0	100	700,000	wet
Scandinavia	0	100	250,000	wet
France	10	90	250,000	wet
Japan	10	90	2-3M	wet
Switzerland	10	90	300,000	wet
UK	10	90	> 50,000	wet
Asia/Pacific	20	80	> 1M	wet
Brazil	20	80	400,000	wet
Germany	20	80	500,000 to 1M	wet very recently
India/Nepal	20	80	300,000	wet (large projects)
Spain	20	80	300,000	wet
Greece	30	70	200,000	wet
Hong Kong	30	70	100,000	wet
Colombia	40	60	200,000	wet
Rest of Latin America	40	60	> 300,000	wet
China	60	40	> 1M	wet (large projects)
USA	70	30	500,000	wet
Austria	80	20	250,000	wet – slow change

Tabla 1: Tendencias de utilización de vías seca y húmeda en los diferentes países (2001). Fuente: [11].

Durante las siguientes décadas, 1970, 1980 y 1990 la incorporación de nuevos materiales a la mezcla como fibras, aditivos, aire ocluido, etc. así como la calidad y capacidad de los equipos, impulsaron el desarrollo del hormigón proyectado hasta nuestros días.

2.2.2. Métodos

Como se ha descrito en el desarrollo histórico de la técnica de proyección, el hormigón puede ser proyectado mediante dos procedimientos o vías: la vía seca y la vía húmeda.

Según la normativa española [12], la vía seca consiste en mezclar previamente todos los componentes del hormigón proyectado, a excepción del agua, que es incorporada en la boquilla de salida antes del lanzamiento de la mezcla. El transporte de la mezcla, sin agua (únicamente con la aportada por la humedad de los áridos), se realiza a través de mangueras especiales de forma neumática hasta la boquilla. Por otro lado, la vía húmeda, es el procedimiento por el cual todos los componentes del hormigón proyectado, incluyendo el agua (exceptuando los aditivos aceleradores de fraguado que se incorporen en la boquilla), son mezclados previamente antes de ser incorporados a la manguera, a través de la cual son transportados mediante bombeo hasta la boquilla donde se aplica el aire comprimido para proyectar el hormigón.

Hasta la década de 1990, la vía seca era el procedimiento predominante en la proyección de hormigón, pero a partir de ese momento y debido a las ventajas que presenta la vía húmeda frente a la seca (menor porcentaje de rebote, menor desgaste del equipo, etc.) [12], esto ha cambiado.

Como se observa en la tabla 1[11], que data de 2001, gran cantidad de países utilizan entre el 70-100% la vía húmeda para sus proyectos, observándose una clara tendencia de los países que utilizan la vía seca (en porcentajes altos), a desarrollar el procedimiento húmedo en los próximos años.

2.2.3. Composición de la mezcla

Para el diseño y posterior proyección de la mezcla es imprescindible controlar la calidad y las dosificaciones de los materiales, la relación agua/cemento, las condiciones de trabajo y el equipo empleado, para asegurar una correcta puesta en obra y controlar la porosidad y el rebote del conjunto [13]. Las características de la composición variarán en función de la vía de proyección que se utilice, pero de forma general se pueden destacar algunas propiedades generales que indica la normativa como son [11] [12]:

-Los componentes principales son generalmente cemento, áridos, adiciones (micro sílice) y aditivos (súper plastificantes y aceleradores de fraguado).

-Se emplea una elevada cantidad de cemento, que puede sustituirse por adiciones, normalmente micro sílice (en porcentaje de sustitución entre 5% y 20%) para mejorar las propiedades de la mezcla por su carácter puzolánico y para reducir la cantidad de cemento con la consecuente reducción de huella de carbono y coste.

-En cuanto a los áridos, se emplearán tamaños inferiores a 8 mm para morteros proyectados y tamaños de 12 y 16 mm para hormigones proyectados. Hay que tener en cuenta que, a mayor tamaño máximo, mayor rebote y cuanto más finura, más retracción.

-Los aditivos normalmente empleados son los aceleradores de fraguado, que dependerán del tipo de cemento empleado, de la cantidad de agua y de la temperatura ambiente, pudiéndose utilizar aceleradores líquidos o en polvo.

También se emplean súper plastificantes en función de la relación Agua/Cemento empleada.

-Como ya se ha comentado con anterioridad, pueden incorporarse mayas de acero o fibras, para reducir la fisuración y los costes y aumentar la seguridad, durabilidad y resistencia a flexotracción.

2.2.4. Aplicaciones

La gran cantidad de ventajas que presenta el material amplía el rango de aplicaciones. Algunas de esas ventajas son la no necesidad de encofrados y como consecuencia la reducción de costes asociados, la movilidad y adaptabilidad a todo tipo de superficies (verticales, horizontales, irregulares y curvas) y la compatibilidad con elementos estructurales de acero [14]. Así, cuando es inevitable e impracticable la colocación de encofrados por la dificultad de acceso al área de trabajo o cuando deben realizarse obras ejecutadas in situ es una buena alternativa a la puesta en obra convencional.

Las principales aplicaciones de la técnica de proyección son:

- Obras subterráneas, túneles y minería
- Obras de rehabilitación, para reparación estructural
- Protección contra incendios, en elementos metálicos
- Otras estructuras, como piscinas, muros, bóvedas y estructuras laminares.

La normativa [12] clasifica los hormigones proyectados, según las aplicaciones para las que se utiliza y según la función de dichos hormigones. Por ello, se puede diferenciar entre hormigones proyectados convencionales, refractarios, con fibras y especiales según las aplicaciones para las que se emplea y hormigones proyectados de tipo I, II y III según la función para la que se utiliza.

A pesar de todas las ventajas y aplicaciones ya comentadas, también se debe tener en cuenta, algunos de los inconvenientes que han surgido desde los inicios del desarrollo de la técnica. La falta de estandarización en las instrucciones internacionales, el deficiente control de calidad y la responsabilidad estructural que implican algunas de las aplicaciones, han supuesto un problema para el desarrollo de la proyección.

Durante el progreso de la técnica, la realización de ensayos de forma indiscriminada para hormigones convencionales y proyectados, conociendo las diferencias en la puesta en obra, supuso algunos inconvenientes. Sin embargo, en la actualidad, ya se desarrollan normativas específicas y ensayos para el hormigón proyectado, como los que se presentan a continuación.

2.2.5. Normativa

Algunas de las normativas existentes en la actualidad sobre hormigón proyectado son las siguientes:

NORMA	TÍTULO
ACI 506R-05	Guide to Shotcrete
ACI 506.2-95	Specification for Shotcrete
ACI 506.1R-08	Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete.
ACI 506.5R-09	Guide to Specifying Underground Shotcrete
EFNARC, 1996	European specification for sprayed concrete.
EFNARC, 1999	European specification for sprayed concrete, Guidelines for specifiers and contractors.
UNE-EN 14487-1:2008	Hormigón proyectado, Parte 1: Definiciones, especificaciones y conformidad
UNE 83601-2013	Hormigón proyectado. Determinación del tiempo de fraguado.
UNE-EN 14487-2:2008	Hormigón proyectado, Parte 2: Ejecución
UNE-EN 14488-2007	Ensayos de hormigón proyectado. Parte 2: Resistencia a compresión del hormigón proyectado a corta edad.
UNE 83605-2013	Hormigón proyectado: Obtención, preparación y ensayo a compresión o tracción de probetas testigo.
UNE-EN 83606-1991	Obtención, preparación y ensayo a flexotracción de probetas testigo.
UNE 83607-2014 IN	Hormigón proyectado. Recomendaciones de utilización.
UNE 83608-2012	Hormigón y mortero proyectados. Determinación del rechazo.

2.3. Hormigones especiales

Como es conocido, el hormigón presenta muy buena resistencia a compresión, pero mal comportamiento a tracción, siendo esto el principal inconveniente del material. Este hecho justifica el surgimiento y desarrollo de algunos materiales especiales, resultado de combinar dos o más materiales para obtener mejoras en las propiedades finales, es decir, mezclar materiales de diferente naturaleza, los cuales, de forma individual, presentan inferiores características mecánicas, físicas o químicas de las que presenta el conjunto del material compuesto [15].

Como ejemplo tradicional, se puede destacar el material de adobe para la construcción de viviendas, siendo un material compuesto por barro y paja, que presenta mejores propiedades al combinarse, que dichos materiales por separado [16].

El hormigón armado es también un material compuesto, nacido a durante el siglo XIX, cuando William Wilkinson y Joseph-Louis Lambot, incluyeron armaduras de hierro al hormigón para mejorar la resistencia de las viviendas.

A partir de ese momento, y experimentando un gran avance durante el siglo XX y XXI, el desarrollo de hormigones especiales (hormigones con fibras, con áridos reciclados, auto compactantes y ligeros, etc.) en el campo constructivo ha ido en aumento de forma muy significativa, incluyéndose este tipo de hormigones en la última Instrucción de Hormigón Estructural [17], concretamente en los anejos 14, 15, 16, 17 y 18.

En lo que se refiere a este proyecto, desarrollar un material compuesto por una matriz cementante, que pueda incorporar fibras y que presente unas características concretas es el principal objetivo. La incorporación de fibras de diferente naturaleza, en las mezclas de hormigón, ha supuesto un gran avance, debido a que estos hormigones reforzados con fibras han revolucionado el mercado por disminuir los costos y actuar estructuralmente, ya que la adición de fibras mejora las características de tenacidad, control de fisuración y resistencia a flexotracción.

Existen fibras de diferente y muy variada naturaleza, aunque la última Instrucción de Hormigón Estructural [17] las clasifica en función de su naturaleza en: fibras de acero, fibras poliméricas y fibras inorgánicas.

La mejora de ciertas características en el hormigón al incorporar fibras depende de algunas propiedades como son el tipo de fibras utilizadas y sus características geométricas (longitud, diámetro equivalente y esbeltez), el volumen de la fibra incorporada (en porcentaje) y la orientación de las fibras en la matriz, entre otras [17], [18].

A continuación, se presentan dos tipos de hormigones distintos que utilizan fibras de diferente naturaleza.

2.3.1. Hormigón de muy altas prestaciones con fibras (UHPFRC)

El hormigón de muy altas prestaciones reforzado con fibras, también denominado UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete), es según la AFGC [19], un material con matriz cementante que presenta una resistencia característica a compresión a los 28 días de más de 150 MPa, pudiendo alcanzar hasta los 250 MPa, que posee elevada resistencia a flexotracción y un comportamiento muy dúctil.

Se trata de un producto que nace de la suma o combinación de tres tecnologías recientes utilizadas para el hormigón: la auto compactabilidad, el empleo de fibras de diferentes dimensiones y características (en este caso metálicas) y las altas resistencias [20] [21].

2.3.1.1. Reseña histórica

El UHPFRC es un material cementante avanzado, prácticamente nuevo que se está desarrollando, tras varias décadas de investigación y generación de patentes, en muchos lugares como Norte América, Japón y Europa Occidental.

Su reciente origen es francés y se remonta a mediados de la década de los 90 [22]. A partir de ese momento, se realizan numerosas investigaciones conjuntas por todo el mundo por parte de las universidades y de algunas empresas como BSI/CERACEM, DUCTAL, BCV y CEMTECmultiscale [23] [21], que presentan al mercado numerosas patentes con dicho material.

2.3.1.2. Composición de la mezcla

A pesar de la gran cantidad de dosificaciones existentes para crear hormigones con estas características, todas ellas tienen aspectos comunes que pueden considerarse generalidades de las mezclas, como son:

-Todos los materiales empleados para estas mezclas, requieren materias primas exclusivas y muy cuidadas, en cuanto a la geometría y la naturaleza de los compuestos.

-Los principales componentes de las mezclas son:

- **Cemento.** Debe seleccionarse cuidadosamente. Se suelen emplear cementos de clase resistente intermedia, Resistentes a Sulfatos, con el objetivo de incrementar la trabajabilidad, reducir la retracción y permitir la evolución de las resistencias durante el tiempo. Se emplea gran cantidad de cemento, que puede reducirse por la adición de árido grueso (entre 5 y 8 mm) y de otras adiciones como humo de sílice o harina de cuarzo que también pueden reducir la cantidad de cemento y como consecuencia la huella de carbono que provoca su producción.
- **Áridos.** De pequeño diámetro, normalmente con tamaño máximo del árido inferior a 0,8 mm, que tengan todos ellos, altas resistencias. Como ya se ha explicado, también pueden emplearse áridos grueso (entre 5 y 8 mm) para reducir la cantidad de cemento.
- **Adiciones como humo de sílice y harina de cuarzo** para conseguir la máxima compacidad al actuar como fracción fina de la composición, reduciendo también la cantidad de cemento.
- **Fibras metálicas.** Para proporcionar ductilidad, reducir la fragilidad y controlar la fisuración. La naturaleza, tamaño, esbeltez, volumen y otras características dependerán del tipo de respuesta esperado. Normalmente, para controlar la aparición de las primeras fisuras se emplean fibras cortas y esbeltas, mientras que para garantizar la ductilidad ante elevadas deformaciones se emplean fibras largas.

-Otro aspecto importante es la relación Agua/Material cementante, que suele ser baja, entre 0,15 y 0,25, para reducir el número de poros capilares y evitar el transporte de gases y líquidos que ataquen al hormigón. Por ello, también se pueden utilizar aditivos plastificantes para mejorar la trabajabilidad de las mezclas [20] [21].

2.3.1.3. Aplicaciones

La gran cantidad de ventajas que presenta el material, frente a algunos inconvenientes que existen actualmente, han hecho que desde la década de los años 90 se haya utilizado este tipo de material compuesto para diferentes aplicaciones.

Las principales aplicaciones se desarrollan en el campo de la ingeniería civil y estructural, así como en el ámbito arquitectónico y de rehabilitación, con la construcción de elementos como pasarelas, vigas, cubiertas, etc.

El gran abanico de posibilidades y aplicaciones que presenta el material se debe a las ventajas que presenta. Ventajas como:

-La elevada resistencia a compresión y buena resistencia a la tracción, siempre que se incorporen fibras y se estudie las características de éstas en la incorporación.

-La posibilidad de incorporar fibras, para reducir la fragilidad y controlar la fisuración, y la capacidad auto compactante, que aumenta la durabilidad de las estructuras, reduciendo costes asociados al mantenimiento.

-La finura de los materiales utilizados, que disminuye la porosidad y ayuda a aumentar la durabilidad, ya comentada, y que además dota al elemento de valor estético en los acabados. Además hace que puedan construirse estructuras más esbeltas, reduciéndose el volumen de hormigón y como consecuencia los costes asociados.

-La incorporación de algunas adiciones hacen que se reduzca la cantidad de cemento, mejorando la sostenibilidad global.

Pero, a pesar de todas estas ventajas y prestaciones que presenta, es un material que requiere de materias primas exclusivas y de gran calidad (fibras de alto límite elástico, áridos con resistencia elevada, súper plastificantes muy concretos, etc.), unos procesos y maquinaria no convencionales, de medios de puesta en obra muy concretos y sobre todo de un control de calidad muy concreto. Además y como se explica a continuación, no existen criterios unificados normativos sobre el material [24].

2.3.1.4. Normativa

Al tratarse de un material especial prácticamente en desarrollo, existen varios documentos técnicos y recomendaciones, desarrollados por distintos países, que ofrecen algunos criterios sobre caracterización de las propiedades y cálculo de estructuras de este material.

RECOMENDACIONES/DOC.TÉCNICOS	TÍTULO
AFGC/SETRA (2002) FRANCE	Interim Recommendations for UHPFRC.
AFGC/SETRA (2003) FRANCE	Additional Informations for Interim Recommendations.
JSCE (2004) JAPAN	Recommendations UHPFRC.
DAfstB (2003) GERMANY	Sachstandbericht UHPC.
AUSTRALIA	Recommendation report for prestressed beams made with ductal.
USA-FHWA	Diversos documentos para caracterización completa de UHPC.
MODEL CODE 2010	General Recommendations for al fibre concrete types
FIB TG 8.6	Recomendaciones.

2.3.2. Hormigón compuesto por mortero de cemento reforzado con fibras de vidrio álcali-resistente (GRC/GFRC).

El GRC o GFRC (Glass Reinforced Concrete o Glass Fibre Reinforced Concrete) es un material compuesto formado por una matriz de hormigón (con cemento Portland), armado con fibras de vidrio álcali-resistente (AR), dispersas en toda la masa.

2.3.2.1. Reseña histórica

El GRC o GFRC como material compuesto, tiene su principal origen en los fibrocementos, surgidos aproximadamente en 1900. Los fibrocementos son también materiales compuestos, (utilizados en la industria de la construcción), formados por una matriz cementante y fibras de silicato de calcio denominadas, asbato o amianto.

Estas fibras, son sustancias de origen mineral de composición química variable, que en su rotura o trituración son susceptibles de liberar fibras, cosa que no ocurre si en su estado

natural no se las manipula [25]. Estas fibras liberadas, se inhalan al viajar por el ambiente, alojándose y permaneciendo en los pulmones y provocando graves problemas respiratorios que afectan enormemente a la salud [26]. Por ello, los fibrocementos compuestos por fibras de amianto están prohibidos en la actualidad.

Al descubrir el carácter cancerígeno de las fibras de asbesto o amianto, se iniciaron investigaciones para solucionar estos problemas, sustituyendo este tipo de fibras por otras fibras de diferente naturaleza.

Las primeras investigaciones realizadas, tenían como principal objetivo la búsqueda de refuerzo en los morteros de cemento y hormigones que mejorase las prestaciones finales del material. Se realizaron experiencias con fibras de naturaleza orgánica (polipropileno, aramidas, etc.), inorgánica (vidrio, carbono, etc.) y metálicas (hierro, titanio, etc.), siendo las fibras de vidrio las que presentaron mejores resultados en cuanto a la relación coste-propiedades mecánicas, además de ofrecer manejabilidad, ser inocuas, no sufrir corrosión y tener impacto ambiental nulo [27][15].

Pero a pesar de todas las ventajas que presentaban estas fibras y tras realizar los primeros ensayos con fibra de vidrio tipo “E”, éstas fracasaron debido a la inexistente durabilidad tras su exposición al ataque químico de los cristales en el medio altamente alcalino del cemento.

Por ello, en 1967 el Dr. A.J. Majundar, del Building Research Establishment (BRE), en el Reino Unido, inició su investigación de los vidrios que contenían zirconio, logrando convertir alguno de ellos en fibra, demostrando así, la resistencia que alcanzaban los productos fabricados con estas fibras ante el ataque alcalino [15][28].

A partir de este momento, este material compuesto formado por una matriz cementante y fibras AR, comenzó a desarrollarse por todo el mundo, recibiendo un gran impulso en los Estados Unidos, donde se utilizaron placas de dicho material conectadas a estructuras metálicas, denominándolas “skin+stud frame” y que en la actualidad es la solución más empleada para las soluciones de fachadas, en este mismo lugar [28].

2.3.2.2. Métodos

[28] En primer lugar, se trata de un material que se presenta en paneles o láminas de gran ligereza, de 1 cm de espesor aproximadamente. De forma general se utilizan pistolas de proyección para proyectar sobre un molde las diferentes capas de la mezcla (con un espesor medio aproximado de 3 mm), que se irán compactando sucesivamente hasta formar el espesor final de la lámina. Para evitar que en la cara vista de los paneles se observen las fibras de vidrio AR, en la primera capa proyectada no se utiliza fibra.

De forma particular, existen varios métodos para obtener las láminas de GRC/CFRC. Estos métodos son:

-Proyección simultánea: consiste en una pistola de proyección con doble salida, que dispara simultáneamente el mortero con la fibra, proyectando por un lado el mortero y por otro la fibra, previo corte de ésta, la cual se suministra en filamento continuo.

-Premix o premezclado: consiste en mezclar el mortero con la fibra AR antes de realizar la proyección o vertido sobre el molde. Cuando ya se ha realizado la mezcla, se puede proyectar con una pistola o verter por colada, con posterior vibración, sobre el molde. Se trata de un método utilizado para piezas estandarizadas y producidas en serie, por producir una reducción de costes, y para elementos que requieran alto grado de elaboración formal.

-Proyección automática: consiste en un robot que posee una pistola de proyección sujeta a un utillaje mecanizado y automatizado que realiza un movimiento de vaivén transversal sobre unos moldes, los cuales pasan por debajo.

2.3.2.3. Composición de la mezcla

[15][29][30][31][32] Existe una amplia posibilidad de variación en las dosificaciones o mezclas, en función del uso del producto final o del método de fabricación elegido (proyección o premezclado), pero se va a considerar una mezcla estándar, entendiendo que ésta dosificación estándar, puede variar en cantidad, procedencia, tipología y marca de los materiales.

De forma general, la composición de la mezcla estará formada por Cemento Portland, arena, agua, aditivos y fibra de vidrio AR, siendo las relaciones y criterios más importantes los siguientes:

-Mantener el contenido de agua lo más bajo posible con una relación aproximada de Agua/Cemento entre 0,30 y 0,35, porque a más cantidad de agua menor resistencia.

-Mantener una relación aproximada de Arena/Cemento 1:1, no utilizando proporciones menores a 0,67, porque un exceso de cemento puede provocar problemas de retracción.

-Utilizar aditivos súper plastificantes o fluidificantes en una proporción aproximada del 1% del peso del cemento, para reducir la cantidad de agua.

-Utilizar la cantidad de fibras de vidrio AR adecuada que dependerá del proceso de fabricación del GRC, de la aplicación y de la resistencia requerida para el GRC. Una dosificación baja de fibras puede ser insuficiente para cubrir las resistencias mecánicas requeridas.

- Si el método de fabricación es la proyección la cantidad de fibras de vidrio AR puede ser mayor (aproximadamente del 5% del peso del cemento), mientras que si se trata del método premezclado la cantidad de fibras deberá ser menor (en torno al 3% del peso del cemento).
- Si la aplicación para la que se utilizará el material GRC/GFRC exige una gran resistencia, será necesario un alto porcentaje de fibras (aproximadamente 5% del peso de cemento). Además la longitud y orientación de las fibras serán factores importantes para la adquisición de resistencia.

2.3.2.4. Aplicaciones

La gran variabilidad de aplicaciones de dicho material, son debidas a las ventajas que presenta, siendo éstas la alta resistencia a tracción y flexión (debido a las fibras de vidrio AR), resistencia alcalina, al impacto, a la propagación de fisuras y a los agentes atmosféricos, incombustibilidad, impermeabilidad, alta manejabilidad, ilimitadas posibilidades de diseños arquitectónicos, aptitud a ser moldeado e importante ligereza (entre 1/3 y 1/10 del peso de elementos equivalentes en hormigón convencional), repercutiendo positivamente en los costes del transporte, montaje y maquinaria de instalación [15][33].

Las principales aplicaciones de los productos de GRC/GFRC son los cerramientos y las fachadas, para revestir y restaurar [33], pero la tecnología y los métodos empleados para la construcción de estos elementos es muy similar a la que puede emplearse para la extrusión o impresión de piezas de hormigón en 3D.

En la actualidad los tipos de paneles de GRC/GFRC pueden clasificarse en [28] [33] [34]:

-Placa simple o panel laminar: panel más sencillo y de menor peso con un espesor de 10-20 mm, con inercia y utilizado para pavimentos de suelo técnico y para cornisas y molduras (Imagen 4 [28]).

-Skin+Stud frame: paneles conectados, con ganchos, a una estructura metálica (normalmente tubular), la cual se ancla a la estructura principal del edificio. La ventaja de esta técnica, la cual es la más extendida (sobre todo en Estados Unidos), radica en los conectores flexibles, que evitan la rigidez de la estructura metálica con las láminas de hormigón con fibras de vidrio AR, de poco espesor, lo cual produciría fisuras (Imagen 5 [28]).

-Panel Sandwich: paneles compuestos por dos láminas (normalmente de 10 mm), unidas perimetralmente conformando una paralelepípedo muy resistente, que están separadas por un núcleo de poliestireno expandido, el cual tiene función aislante acústica y térmicamente (Imagen 6 [28]).

-Panel nervado: paneles formados por una placa simple rigidizada con nervios formados gracias a la colocación de un material ligero, el cual se cubre posteriormente con la proyección de la mezcla de GRC/GFRC. Normalmente, se realiza un tratamiento superficial para evitar retención de humedades entre las nervaduras y la placa (Imagen 7 [28]).



Imágenes 4 y 5: izquierda, placa simple o panel laminar; derecha, Skin+Stud frame. Fuente: recursos electrónicos [28].



Imágenes 6 y 7: izquierda, panel sandwich; derecha, panel nervado. Fuente: recursos electrónicos [28].

Además de todos estos, también se utilizan estos paneles como ornamentos arquitectónicos, pudiéndose reproducir celosías, pilastras, cornisas, elementos de decoración, etc.

2.3.2.5. Normativa

Algunas de las normativas existentes en la actualidad sobre hormigón compuesto por mortero de cemento reforzado con fibras de vidrio álcali-resistente (GRC/GFRC) son las siguientes:

NORMA	TÍTULO
ACI: ASTM C 947-03 (2009)	Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete.
ACI: ASTM C1229-94 (2015)	Standard Test Method for Determination of Glass Fiber Content in Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC).
ACI: ASTM C1230-96 (2015)	Standard Test Method for Performing Tension Tests on Glass-Fiber Reinforced Concrete (GFRC) Bonding Pads.
ACI: ASTM C1666/C1666M-08 (2015)	Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRC and Fiber-Reinforced Concrete and Cement.
ACI: ASTM C1228-96 (2015)	Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete.
UNE-EN 1169-2000	Productos prefabricados de hormigón. Reglas generales para el control de producción en fábrica de hormigón armado con fibra de vidrio.
UNE-EN 1170-1, 1998	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la consistencia de la matriz, método denominado “por exposición”.
UNE-EN 1170-2, 1998	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida del contenido en fibra del GRC fresco, método denominado “separación por lavado”.
UNE-EN 1170-3, 1998	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida del contenido en fibra del GRC proyectado.
UNE-EN 1170-4, 1998	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la resistencia a flexión, método “ensayo simplificado a flexión”.
UNE-EN 1170-5, 1998	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de la resistencia a flexión, método denominado “ensayo completo a flexión”.
UNE-EN 1170-6, 1998	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Determinación de la absorción de agua por inmersión y determinación de la densidad seca.
UNE-EN 1170-7, 1998	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Medida de las variaciones dimensionales extremas en función del contenido de humedad.
UNE-EN 14649-2006	Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para la determinación de la resistencia remanente de las fibras de vidrio en el cemento y el hormigón (ensayo SIC).
UNE-EN 15191-2011	Productos prefabricados de hormigón. Clasificación de prestaciones del hormigón reforzado con fibra de vidrio.
UNE-EN 15422-2009	Productos prefabricados de hormigón. Especificaciones para las fibras de vidrio destinadas al armado de morteros y hormigones.

2.4. Fabricación aditiva. Impresión en 3D

Como ya se conoce, el conjunto de actividades que se realizan durante la actividad constructiva tradicional plantea una serie de inconvenientes como son la eficiencia durante las tareas, la gestión de residuos y consecuente huella de carbono, el tiempo empleado en la ejecución, los costes, las limitaciones de forma, así como las lesiones y problemas de los trabajadores durante la actividad.

Entre todos ellos, es importante destacar el riesgo que supone la actividad constructiva convencional, al tratarse de una de las industrias más peligrosas, por las numerosas bajas que suponen los accidentes laborales, tanto leves como graves. Además, la existencia de gran cantidad de residuos generados (millones de toneladas al año) por las actividades constructivas y de demolición, es cada día más notable.

El desarrollo de la automatización en otros sectores distintos al constructivo, ha supuesto la solución a distintos problemas, ahorrando costes y tiempos. Por este motivo, se plantea aplicar la automatización al proceso constructivo, concretamente la técnica “Fabricación aditiva” que tiene como objetivos la creación de un medio más seguro y más sostenible, reduciendo costes y tiempos de ejecución y dando libertad al diseño arquitectónico y constructivo, al automatizar el proceso constructivo tradicional.

Por todo ello, en la actualidad ya se desarrollan piezas y elementos de hormigón en 3D, obtenidos mediante la fabricación aditiva, que impulsan en gran medida la industria de la construcción y la arquitectura [3] [35].

2.4.1. Introducción y reseña histórica

La fabricación consiste en la producción de objetos y elementos, mediante medios mecánicos. Se trata de un proceso que ha evolucionado en los últimos siglos de forma muy significativa, con la llegada de las sucesivas Revoluciones Industriales (siglos XVIII y XIX), las cuales han supuesto un desarrollo en los procesos de mecanización y fabricación de productos en serie.

La existencia de abundantes medios mecánicos distintos que trabajan de forma desigual entre ellos, ha concurrido a una clasificación en grupos de las diferentes fabricaciones existentes en función de los medios mecánicos utilizados y del proceso de fabricación. De este modo, se puede organizar la producción en tres grupos diferentes: la fabricación por mecanizado del material, la fabricación por conformado del material y la fabricación por adición del material.

Los dos primeros procesos de fabricación pueden clasificarse como convencionales, por ser los que más tiempo llevan implantados en la sociedad, mientras que la producción por adición del material, Fabricación Aditiva o Additive Manufacturing, [denominada también Generative Manufacturing, eManufacturing, Constructive Manufacturing (Alemania), Additive Layer Manufacturing-ALM (Escandinavia y EADS), Direct Digital Manufacture-DDM, Freeform Fabrication-FFF, Solid Freeform Fabrication-SFF (Estados Unidos)], es un proceso novedoso cuya antigüedad se remonta algunas décadas atrás.

La fabricación aditiva (AM), puede definirse como aquella producción que utiliza la tecnología para automatizar un proceso con el objetivo de producir objetos tridimensionales desde un modelo digital, mediante la deposición de material (originalmente en estado sólido, líquido o en polvo), de forma precisa y dentro de un espacio predeterminado. Se trata de una tecnología idónea para reproducir cualquier objeto que se quiera, siempre que pueda dibujarse digitalmente.

Se han desarrollado varios procedimientos de Fabricación Aditiva, denominados inicialmente procesos de Prototipado Rápido o Rapid Prototyping (RP), por concebirse estas nuevas tecnologías con el objetivo de realizar únicamente prototipos. Pero, en la actualidad el Prototipado Rápido no se reduce a la creación de prototipos, sino que tiene otro enfoque más amplio, como es la automatización de la producción en capas para crear objetos tridimensionales en serie a través de diferentes procesos. Uno de estos procesos es la impresión 3D, la cual ha surgido como resultado de desarrollar otras técnicas anteriores.

Los primeros procesos de Fabricación aditiva, denominados procesos de Prototipado Rápido, se remontan a 1984, cuando Chuck Hull patenta su sistema en Estados Unidos con el nombre de estereolitografía (STL), creando en 1987 la empresa norteamericana llamada 3D Systems, la cual comercializó el primer sistema de prototipado.

A partir de ese momento, en 1988 y 1989, surgieron empresas japonesas que crearon sus propias máquinas de estereografía, pero hasta 1990 estas técnicas no llegaron a Europa. Durante esa época, la empresa alemana EOS (Electro Optical Systems), desarrolla su sistema e inicia el desarrollo de nuevos procesos como son FDM, SGC, LOM, etc.

Pero fue aproximadamente durante la mitad de esta década (1995) cuando aparecieron los primeros intentos e investigaciones sobre la impresión 3D en la industria de la construcción y la arquitectura. El investigador Joseph Pegna [36] sugirió incorporar materiales a base de cemento a estas nuevas tecnologías, propiciando el desarrollo de este tipo de procesos con matrices cementantes. A partir de ese momento, investigadores como Enrico Dini y Behrokh Khoshenevis, así como el grupo de investigación "Rapid Manufacturing Research Group of Loughborough University", desarrollaron diferentes procedimientos para imprimir el material por excelencia en la industria constructiva, el hormigón.

En la actualidad, todos ellos, están al frente de diferentes empresas como son D-Shape, Contour Crafting y Concrete Printing, las cuales desarrollan procesos de fabricación aditiva a gran escala, destinados al campo de la construcción y la arquitectura en el dominio público y a escala mundial.[3] [37] [38] [39].

2.4.2. Fases

[38] [40] Los diferentes procesos de la Fabricación Aditiva, como es el caso de la impresión en 3D con materiales cementicios, siguen de forma generalizada los mismos pautas en cuanto a sus fases, aunque existen variaciones en función del método de fabricación empleado. De esta forma pueden distinguirse 3 fases diferenciadas:

-La primera fase es la fase de digitalización o creación y gestión del archivo STL:

Consiste en crear un archivo STL, dibujando en un software especializado (CAD, CATIA, RHINOCEROS) el elemento que se quiere construir en 3D. Cuando ya se ha plasmado la forma deseada del producto en el modelo del programa específico, se transforma el objeto en una malla de puntos formada por triángulos. Cuanto más se triangule el volumen creado, más información matemática tendrá el modelo y más peso tendrá el archivo generado, como se observa en la imagen 8.

Este formato de triangulación se denomina STL y en él se encuentra toda la información geométrica del elemento pero transformada a información matemática.

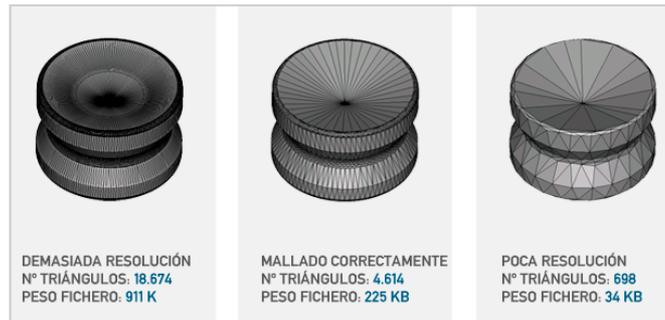


Imagen 8: Triangulación del elemento en archivo STL. Fuente: recursos electrónicos (<http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl>).

-La segunda fase es la fabricación o construcción del elemento creado anteriormente:

Consiste en el desarrollo del elemento mediante la impresora 3D, es decir, el emplazamiento del elemento en un espacio, que dependerá exclusivamente del método empleado, los cuales se explicarán a continuación. En esta fase es muy importante tener en cuenta factores como la precisión y el espesor de las capas. Además, se controlará la duración de la impresión completa del elemento que dependerá directamente del tamaño y de la altura de éste.

En función del método, esta fase puede ser la última.

-La tercera fase es el acabado o terminación del elemento final:

Consiste en aquellos procesos necesarios para finalizar el elemento, en cuanto a su acabado superficial, extracción de soportes, vaciado de material sobrante, operaciones para mejorar las propiedades del elemento, etc., siempre que la técnica empleada así lo requiera, para conseguir que el producto final sea el correspondiente para su uso previsto.

2.4.2. Métodos y nuevas tecnologías

Como ya se ha comentado anteriormente, en la actualidad existen 3 métodos distintos que desarrollan esta tecnología de la impresión 3D en el campo de la construcción y arquitectura. Estas 3 tecnologías distintas, las desarrollan 3 empresas especializadas en esta técnica, denominadas Contour Crafting, D-Shape y Concrete Printing.

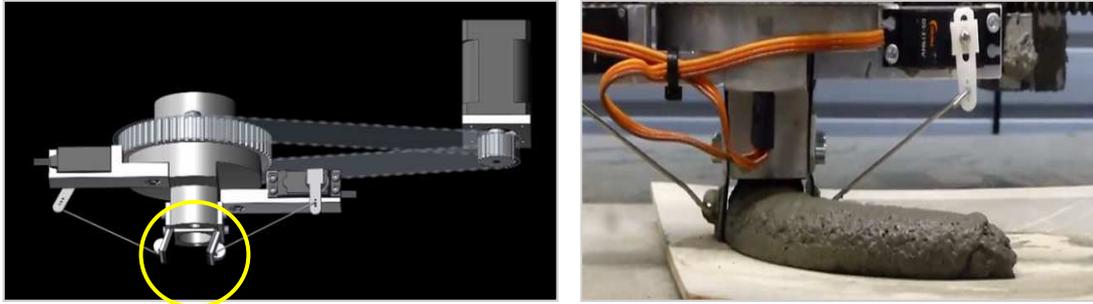
Pero antes de comentarlas, es importante comentar que las primeras investigaciones sobre Fabricación Aditiva que incluían materiales propios del campo constructivo, como son áridos y cemento, fueron llevadas a cabo con el investigador Joseph Pegna [36]. El autor, comenzó a investigar sobre la aplicación de las nuevas tecnologías de mecanización de procesos, aplicándolas al proceso constructivo con los materiales necesarios para llevarlo a cabo. En estas investigaciones experimentó sobre la deposición de una fina capa de arena, seguida por otra deposición de cemento, aplicando posteriormente a la capas, vapor, para obtener un curado rápido, todo ello basado en la primera técnica de Fabricación Aditiva, la estereolitografía.

CONTOUR CRAFTING

[41] Tecnología introducida en 1998 por el ingeniero Behrokh Khosnevis. Su investigación deriva del deseo de crear herramientas inteligentes que puedan realizar automáticamente las funciones y trabajos actualmente realizados de manera convencional por los seres humanos [40], es decir, automatizar la construcción de elementos y productos, que se realizaban de forma tradicional, como es el caso de las construcciones u obras con hormigón.

-La tecnología Contour Crafting consiste en la extrusión de una pasta cementante mediante la acumulación de capas, mediante una máquina de extrusión o impresión, presentando varias **características** importantes [38] [40]:

1. La máquina de impresión incorpora 2 paletas o llanas perpendiculares entre sí, que pueden regularse en su orientación, las cuales actúan como superficies sólidas y planas proporcionando una excelente calidad lisa de las superficies, como se muestra en las imágenes 9 y 10.



Imágenes 9 y 10: Paletas de Contour Crafting para acabado liso. Fuente: recursos electrónicos (https://www.youtube.com/watch?v=1Pg4YVi_Q-M)

2. La velocidad de fabricación es elevada.
3. La impresora tiene capacidad para integrarse con varias tecnologías robóticas.
4. Posibilidad de fabricación simultánea de varias máquinas secundarias, conectadas a la principal, ahorrando tiempos y costes de forma significativa, como se observa en la imagen 11 [40].

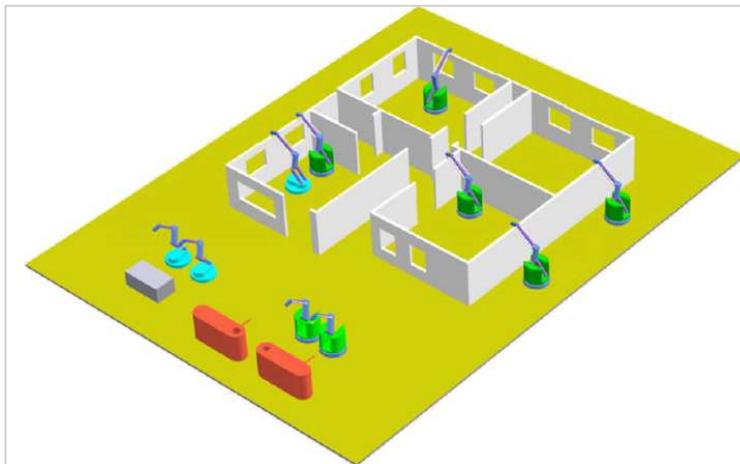


Imagen 11: Esquema de simultaneidad de una vivienda. Fuente: [40].

-El **proceso de ejecución** de esta tecnología consta de dos fases diferenciadas que son necesarias combinar [40]:

El primero, es el proceso de extrusión, mediante el cual se realiza la superficie del objeto, es decir, los bordes exteriores de la pieza o construcción (imagen 12 [42]).



Imagen 12: Extrusión del elemento. Fuente: [42].

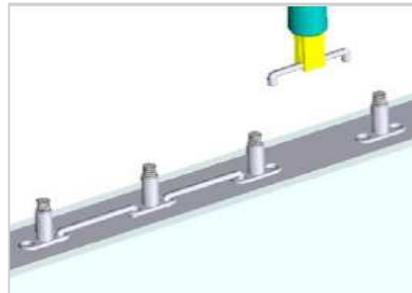
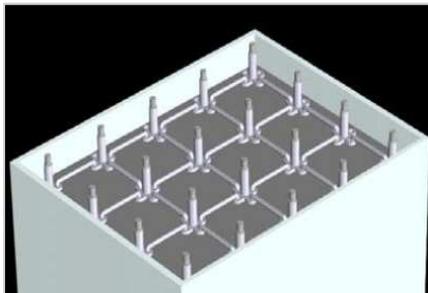
El segundo, es el proceso de llenado, mediante el cual se realiza el núcleo del objeto. El material se vierte dentro del área definida por la extrusión del proceso anterior (imagen 13[42]).



Imagen 13: Llenado del elemento. Fuente: [42].

Al tratarse de dos procesos diferenciados, los **materiales** pueden ser distintos para el proceso de llenado y de extrusión, lo cual crea estructuras compuestas por diferentes materiales y composiciones que dependerán de la región. Además la cantidad de material y la dosificación está controlada por el ordenador.

En cuanto a la incorporación de **acero**, para suplir el problema del hormigón a tracción, se pueden incorporar de forma mecanizada, armaduras de refuerzo (tipo malla), en algunos elementos estructurales, concretamente durante el proceso de llenado, como es el caso de los pilares y muros (imagen 14 y 15 [40]). Además, y como alternativa a la colocación de mallas y elementos de acero, se está estudiando la incorporación de fibras de carbono y de vidrio, por la misma boquilla de extrusión o por otra boquilla paralela, además de poder realizarse el proceso de post-tensado para dotar a la estructura de refuerzo y mejorar así la resistencia.



Imágenes 14 y 15: Armaduras de refuerzo en pilares y muros. Fuente: [40].

Por último, en lo que se refiere a **acabados**, la tecnología Contour Crafting no necesita grandes acabados, debido a las paletas que se incorporan en la boquilla, las cuales permiten que la superficie quede perfectamente lisa. Por ello, puede incorporarse a la máquina de extrusión o impresión un sistema automatizado de pintura o un sistema automatizado de revestimientos para paredes y suelos que confieran al elemento estructural el acabo deseado para un uso final inmediato[3][40].

D-SHAPE

De forma paralela a Contour Crafting, esta tecnología fue desarrollada y patentada a mediados de la década de los 90, por Enrico Dini, ingeniero civil y mecánico. Esta técnica se diferencia del resto por el método de fabricación de la pieza, que consiste en una catalización selectiva de materiales dentro de un sustrato, como se desarrollará a continuación, y no en la extrusión del material que ya ha sido premezclado, como en el caso de Contour Crafting y Concrete Printing [40] [43] [53].

Esta técnica, se basa en los mismos principios que investigaba J.Pegna, es decir, en la primera técnica desarrollada en los inicios de la Fabricación Aditiva, la estereolitografía. Ésta, consistía

en la utilización de un láser ultravioleta para solidificar finas capas de resina acrílica, depositadas una tras otras, hasta formar el objeto en 3 dimensiones [37].

-El proceso de fabricación de los elementos y el material utilizado como aglutinante son las principales **características** de esta tecnología, debido a las ventajas que ofrece el catalizador utilizado.

Como catalizador, no se utiliza como se ha hecho tradicionalmente el cemento Portland, sino que se emplea un catalizador natural, obtenido de la desalinización del mar. Este hecho presenta una gran ventaja como es la reducción de la huella de carbono asociada a la producción de cemento.

-El proceso de **ejecución** de este método de impresión consiste en la colocación alterna de capas de una mezcla seca y la impresión por un líquido o catalizador ligante. El objetivo es que cada capa debe estar completamente unida a la anterior, para evitar el desmoronamiento de la pieza. En el proceso de unión mezcla seca catalizador, se obtiene una mezcla que se comporta como una roca presentando muy buenas características de absorción, resistencia a heladas y transmitancia.

Por todo ello, el proceso consta de varias fases diferenciadas:

1.Introducción de la mezcla seca (áridos, óxidos metálicos y fibras) en la maquina empleada.

2.Deposición de la mezcla seca de forma automática y extensión de dicha mezcla sobre la superficie homogénea (Imagen 16 [40]).



Imagen 16: Deposición de la mezcla seca. Fuente: [40].

3.Compactación mediante rodillos de la mezcla seca, comprimiendo las partículas y asegurando la reducción de la absorción del ligante o catalizador (Imagen 17 [40]).



Imagen 17: Compactación de la mezcla seca. Fuente: [40].

4.Inyección del ligante o catalizador automáticamente sobre la mezcla seca, mediante las boquillas de la impresora, generando la pieza completa por el movimiento de ida y vuelta de la impresora (Imágenes 18 y 19 [40]).



Imágenes 18 y 19: Inyección del ligante. Fuente: [40].

Estas fases se repiten sucesivamente hasta la construcción total de la pieza. Cuando la pieza ha sido construida en su totalidad se pasa a la etapa de **acabado** que consta también de varias fases diferenciadas:

1. Eliminación de la mezcla seca no consolidada, mediante un sistema de filtrado situado en la parte inferior, la cual se envía a la tolva de suministro para volver a utilizarse. Es una fase complicada porque requiere estudio previo para evitar la caída de la pieza (Imagen 20 [40]).



Imagen 20: Eliminación de la mezcla seca. Fuente: [40].

2. Limpieza de las piezas fabricadas de forma manual o mecánica y posterior pulido del elemento.

3. Tratamiento de impregnación al agua de forma opcional.

4. Ensamblar y montar in situ cuando el elemento lo requiera.

En esta técnica desarrollada por D-Shape, es muy importante tener en cuenta los factores de espesor de cada una de las capas generadas, composición química de la mezcla seca y del catalizador, así como la relación entre ambos, características de la granulometría de la mezcla seca y eficiencia y dimensión de la maquinaria utilizada.

CONCRETE PRINTING

Consiste en otra de las tecnologías existentes actualmente, desarrollada por el grupo de investigación "Rapid Manufacturing Research Group the Loughborough University".

Se trata de una técnica similar a la de Contour Crafting, que difiere de ésta en no poseer paletas incorporadas en la boquilla para mejorar el acabado y en que la mezcla de extrusión es distinta. El procedimiento de extracción es prácticamente similar.

OTRAS TENDENCIAS

En la actualidad, están surgiendo nuevos equipos que comienzan a desarrollar obras y elementos con estas tecnologías. Es el caso de Andrey Rudenko y su equipo, que ya han realizado algunas obras, basando su técnica en la tecnología Contour Crafting.

Estos nuevos equipos, se basan en las cuatro técnicas comentadas anteriormente, las cuales presentan claras diferencias y similitudes, algunas de las cuales pueden observarse en la siguiente tabla [3].

CARACTERÍSTICAS	J. Pegna	Contour Crafting	Concrete Printing	D-Shape
PROCESO	Impresión 3D	Extrusión	Extrusión	Impresión 3D
USO DE MOLDE	No	Si (en boquilla)	No	No
MEZCLA-MATERIALES	Arena, cemento y láser	Material cementicio	Material cementicio	Mezcla seca y catalizador
DIAM. BOQUILLA	1 mm	15 mm	9-20 mm	0,15 mm
NUM. BOQUILLAS	-	1	1	6300
GROSOR DE LA CAPA	-	13 mm	6-25 mm	4-6 mm
REFUERZO	No	Si	Si	No
TAMAÑO IMPRESIÓN	➤ 1 m	➤ 1 m	➤ 1 m	➤ 1 m
VENTAJAS	1er intento de libertad de forma	Superficie lisa con llana	Altas resistencias	Altas resistencias
INCONVENIENTES	Colocación masiva de material	Proceso adicional de moldeo previo	Dimensiones de impresión limitadas a 5,4mx4,4mx5,4m	Proceso lento, superficies ásperas, dimensión de impresión limitada al marco de la impresora, eliminación del material no utilizado

2.4.3. Características de las mezclas

Como en las técnicas comentadas con anterioridad, existe gran variedad de dosificaciones que pueden emplearse para desarrollar la técnica de impresión 3D, pero de forma general es importante:

- Utilizar relaciones Agua/ Cemento bajas, entre 0,20-0,25.
- Incorporar aditivos super-plasticantes, que suplan la poca cantidad de agua empleada y aditivos aceleradores de fraguado para obtener resistencias iniciales elevadas y controlar la consistencia y viscosidad.

Pero estas mezclas deben de cumplir unas características principales [3] como son:

- La bombeabilidad o facilidad y fiabilidad con la que el material se desplaza a través del sistema o máquina creada, sin producir atascamientos ni problemas que impidan la deposición del material.
- La imprimibilidad o viabilidad del material al depositarse, sobre la anterior capa extrusionada, mediante el dispositivo o boquilla utilizado.
- La edificabilidad o resistencia del material depositado en deformación bajo carga, es decir la fuerza de cada una de las capas extrusionadas, conforme se incorporan el resto de capas sobre la misma.
- El tiempo abierto, es decir el periodo de tiempo en el que las propiedades descritas anteriormente permanecen dentro de las tolerancias marcadas.

Por todo ello, es imprescindible controlar los tiempos de fraguado de las mezclas, las resistencias iniciales, así como la consistencia y viscosidad adecuada para evitar problemas en la maquinaria empleada y también para asegurar la resistencia del elemento conforme va aumentando en tamaño, garantizando capa a capa esta resistencia y capacidad para soportar la inmediata carga colocada.

2.4.4. Ventajas e inconvenientes

Esta novedosa tecnología, la impresión 3D con hormigón, presenta en la actualidad o puede presentar en un futuro no muy lejano, aplicaciones importantes en campo constructivo y arquitectónico, como son la construcción de conjuntos de viviendas de diferentes usos (residencial, público, etc.), de infraestructuras de obra civil, de viviendas de bajo coste para países en vías de desarrollo, etc. pero también la construcción de pavimentos, elementos arquitectónicos y esculturas [6].

Un ejemplo actual (diciembre 2015) de aplicación de la tecnología impresión 3D con hormigón, es la construcción por parte Andrey Rudenko y su equipo de un pequeño castillo a escala real (21 y 22) y de una suite de un hotel de Filipinas [42], como se observa en las imágenes siguientes (23, 24 y 25).



Imágenes 21, 22: Castillo a escala real construido por Andrey Rudenko y su equipo. Fuente: [42]



Imágenes 23, 24 y 25: Hotel construido por Andrey Rudenko y su equipo. Fuente: [42]

Estas aplicaciones son posibles por las ventajas que presenta la técnica, siendo las más destacadas la reducción de accidentes laborales, la disminución del número de errores de montaje, la optimización en la utilización del material con la consecuente reducción de la cantidad de residuos y huella de carbono, la rapidez de ejecución y la reducción de los costes asociados a todo lo destacado, como consecuencia de una mecanización total del proceso [3] [39].

La principal diferencia entre la Fabricación Aditiva y los procesos convencionales en la construcción, es que en éstos, la fabricación de una pieza compleja supone una gran dificultad en la construcción, que repercute de forma directa en un sobrecoste, por necesitar más tiempo para solucionar las uniones, fabricar un encofrado adecuado, etc., mientras que en el proceso de Fabricación Aditiva la construcción de una pieza compleja supone un ahorro de material y de tiempo, al construir la pieza sin necesidad de encofrados ni uniones, siendo la única dificultad dibujar la pieza en el software correspondiente, lo cual no influye ni en tiempo ni en coste.

Sin embargo, en la actualidad existen algunos problemas todavía no resueltos para la Fabricación Aditiva y en concreto para la impresión 3D centrada en la construcción, que conforme avance el desarrollo de la técnica posiblemente desaparezcan. Por ello, es importante conocer estas limitaciones, para eliminarlas y seguir en el camino del progreso. Estas limitaciones [44] dependerán del tipo de método utilizado en la impresión o extrusión de capas, aunque de forma general pueden resumirse en:

- Dependencia en la utilización de algunos materiales, por la necesidad de adaptabilidad al método desarrollado.
- Precisión limitada o existencia de tolerancias, en cuanto a la necesidad de acabados posteriores a la finalización del método utilizado, necesitando el elemento o la obra, operaciones de pulido, curado y cierto acondicionamiento.
- Tamaño máximo del elemento o construcción está limitado, dependiendo de forma directa de la maquinaria a utilizar.
- Propiedades mecánicas limitadas, por la dificultad que supone encontrar una buena solución para la incorporación de armaduras.
- Inexistencia de normativa para la realización de ensayos particulares al emplear la técnica.
- Coste inicial de la maquinaria de altas prestaciones empleada.

2.5. Proceso de fraguado del cemento portland

Debido a la importancia del proceso de inicio del fraguado en las mezclas especiales desarrolladas en el presente proyecto, es importante explicar las fases de dicho proceso, así como la composición y factores del cemento, que determinarán las características de las mismas.

En primer lugar, es importante distinguir entre fraguado y endurecimiento de las mezclas. El fraguado puede definirse como la condición alcanzada por una pasta cementicia, mortero u hormigón, que ha perdido plasticidad hasta un nivel arbitrario, medido en términos de resistencia a la penetración, llegando a adquirir algo de resistencia, mientras que, el endurecimiento consiste en la ganancia progresiva de resistencias de una pasta fraguada. De forma concreta, el tiempo de fraguado es el periodo durante el cual, el cemento y el agua reaccionan químicamente, a diferentes velocidades de reacción (dependientes de diferentes factores), generando y desprendiendo calor para dar origen a nuevos compuestos, los cuales provocan el posterior endurecimiento y adquisición de las resistencias en la pasta.

Durante el tiempo de fraguado, pueden distinguirse dos fases, que pueden ser determinadas por el ensayo de determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad en volumen, realizado mediante la aguja de Vicat [55], pero pueden caracterizarse de forma generalizada por el inicio de la rigidez de la pasta “Inicio de fraguado” y por la pérdida de plasticidad de la pasta “Final de Fraguado” [45] [46] [47].

2.5.1. Composición del clinker del cemento Portland

Los componentes del clinker del cemento Portland están formados por la combinación de varios óxidos principales, en diferentes cantidades (mayoritariamente en estado cristalino), obtenidos de la descomposición de calizas y arcillas.

Concretamente, los compuestos químicos mayoritarios en el clinker son:

- C₃S, silicato tricálcico o Alita (SiO₂ 3CaO).
- C₂S, silicato bicálcico o Belita (SiO₂ 2CaO).
- C₃A, aluminato tricálcico (Al₂O₃ 3CaO).

- C₄AF, ferrito aluminato tetracálcico o Celita (Fe₂O₃ Al₂O₃ 4CaO).
- C₂F, ferrito dicálcico (Fe₂O₃ 2CaO).

La cantidad de estos compuestos químicos puede variar aunque los compuestos formados por los silicatos (C₃S y C₂S), son los mayoritarios (constituyendo el 75-80% del peso del cemento) [51], siendo los responsables del desarrollo de las resistencias mecánicas como muestra la imagen 26 [46].

También hay que destacar que los compuestos de C₃S y C₃A son los que liberan más calor tras la hidratación del cemento con el agua, siendo el C₃A el que posee la mayor velocidad de hidratación.

Al salir del horno, el clinker se enfría y se muele junto con el yeso para formarse el cemento Portland que junto con el agua reaccionará química y físicamente produciéndose el fraguado y posterior endurecimiento de la pasta.

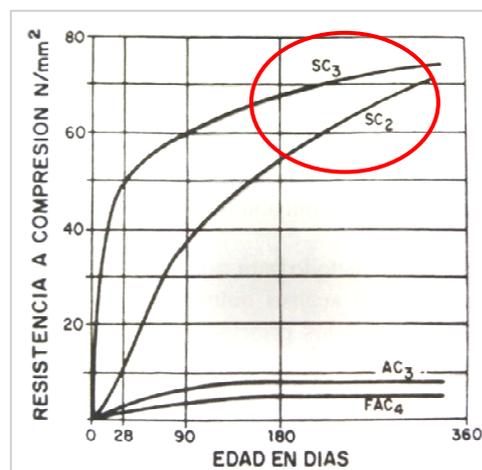


Imagen 26: Evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo, de los componentes principales del clinker Fuente: [46].

2.5.1. Hidratación

La hidratación comienza cuando el clinker del cemento se mezcla con el agua y los aditivos. Se trata de un proceso exotérmico, debido a que lleva asociado la liberación de calor, a causa de un conjunto de reacciones químicas individuales que suceden de forma paralela y sucesiva, provocando cambios químicos al fraguar la mezcla y cambios físico-mecánicos al endurecer ésta posteriormente, obteniéndose un producto final con características distintas a las iniciales. Es un proceso que depende de algunos factores, que serán comentados posteriormente (apartado 2.5.1.2. Factores influyentes en el fraguado del hormigón).

Las reacciones que suceden durante la hidratación pueden resumirse de la siguiente forma:

-Los silicatos (C₃S y C₂S) alita y belita, encargados del desarrollo de las resistencias mecánicas, reaccionan con el agua para formar algunos de los principales compuestos hidratados, el gel de Tobermorita o CSH y la Portlandita o Ca(OH)₂.

- El gel de Tobermorita o CSH es el principal responsable de las resistencias mecánicas de las pastas (debido a su composición por silicatos), proporcionando el esqueleto interno de las pastas al mantener la adherencia con los áridos, de la misma forma que la Portlandita.

- La Portlandita o Ca(OH)_2 , además de tener los mismo efectos positivos que el gel CSH, se encarga del mantenimiento del pH del hormigón (12-13), manteniendo la reserva alcalina de éste, para facilitar la pasivación del hormigón armado, impidiendo la corrosión. Pero, este compuesto tiene algunos efectos negativos como son la solubilidad en agua, la reacción con sulfatos pudiendo provocar procesos de expansión y la facilidad de descomposición a altas temperaturas.

-El aluminato tricálcico (C_3A) al poseer una velocidad de hidratación instantánea, reacciona con el yeso dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), formando otro compuesto hidratado principal, la Etringita.

Si no se produjese la reacción con el yeso, el fraguado hubiese sido instantáneo por capacidad del C_3A de reaccionar. Por este motivo, el yeso actúa como retardador del fraguado, pero si la cantidad de yeso es mayor que la cantidad de C_3A , podría provocar el efecto contrario evitando el proceso de fraguado.

- La Etringita o Sulfoaluminato Cálcico, es el compuesto hidratado que evita la primera reacción de fraguado rápido, siendo el responsable de la formación de los primeros cristales en la mezcla.

-El aluminato tricálcico (C_3A) también puede reaccionar con otros productos hidratados ya formados, como es el caso de su reacción con Etringita para formar Monosulfato y su reacción con la Portlandita o Ca(OH)_2 , para formar Aluminato Cálcico Hidratado.

2.5.1.1. Etapas de la hidratación

[47-51]En el proceso de hidratación del cemento Portland se pueden distinguir cinco etapas diferenciadas (imagen 27), en función del desprendimiento de calor conforme avanza el proceso, que se pueden resumir en:

I.PREINDUCCIÓN

Corresponde a la hidratación inicial de la superficie de las partículas de cemento, provocando el desprendimiento de gran cantidad de calor. La duración de esta etapa es de algunos minutos (entre 15 y 20) y en ella los compuestos del clinker entran en contacto con el agua, formándose productos hidratación como son Portlandita y Tobermorita que van precipitando sobre la partícula.

II.INDUCCIÓN

Se inicia cuando la velocidad de precipitación de los productos hidratados sobre las partículas es mayor que la velocidad de disolución de las partículas en el agua. Se produce una reducción de la velocidad de disolución, debido a que cada una de las partículas de cemento ya tiene una membrana alrededor (formada en la fase anterior), que restringe el contacto de la partícula con el agua, provocando que la pasta sea trabajable.

El desprendimiento de calor disminuye durante esta fase, que dura entre 1 y 3 horas.

III.FRAGUADO/ACELERACIÓN/SOLIDIFICACIÓN

Pasadas aproximadamente 3 horas, las membranas o capas superficiales que recubren los granos de cemento se rompen y/o los cristales de Portlandita crecen, provocando un aumento de la temperatura desprendida, induciendo a esta tercera fase o inicio de fraguado.

En esta fase se vuelve a producir la hidratación de los compuestos y la posterior precipitación masiva de los productos de reacción (Portlandita y Tobermorita en 2º estado) en la partícula que dura aproximadamente desde las 3 a las 12 horas.

El fraguado finaliza cuando la velocidad de hidratación o disolución alcanza el máximo, dando paso a la fase de endurecimiento de la pasta.

IV. DECELERACIÓN

En el momento en el que la velocidad de hidratación alcanza su máximo (al final de la fase anterior) y la velocidad de precipitación de los compuestos hidratados sigue creciendo sobre la partícula, controlándose la velocidad de difusión dentro de cada capa, hasta llegar a un estado más o menos estable (fase siguiente). Hay que tener en cuenta que conforme aumenta el espesor de la capa, la velocidad de difusión disminuye.

La duración de este proceso es de aproximadamente 12 horas.

V. ESTACIONAMIENTO

Se llega a esta fase cuando la velocidad de difusión, dentro de cada capa que rodea cada una de las partículas, es muy lenta, aunque continúe la hidratación y difusión hasta que se agoten los componentes y no exista nada más que hidratar.

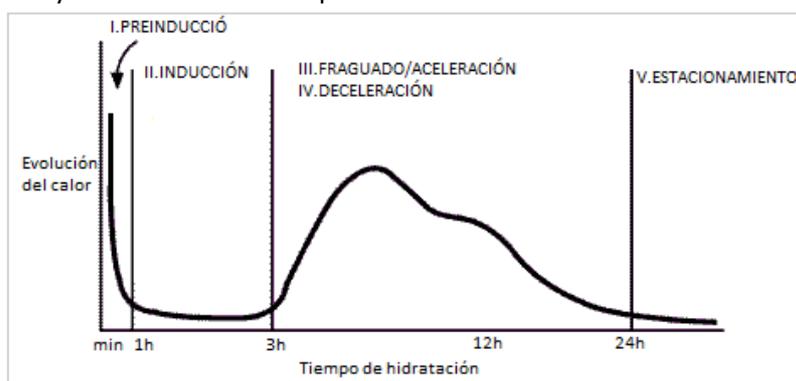


Imagen 27: Relación del desprendimiento de calor con el tiempo en la fase de hidratación del cemento. Fuente: Elaboración propia.

2.5.1.2. Factores influyentes en el fraguado del hormigón

El proceso de hidratación del cemento, así como, otros factores, van a influir de forma directa en el fraguado del hormigón. Entre los más destacables se encuentran:

Tipo y finura del cemento empleado

-El tipo de cemento viene determinado principalmente por la composición química del clinker y la cantidad empleada. Si se emplean altas cantidades de clinker, las cantidades de silicatos disponibles serán mayores, pudiendo hidratarse rápidamente y reducir el tiempo de fraguado.

El empleo de cementos Resistentes a Sulfatos (poseen poca cantidad de C_3A) también va a influir en el tiempo de fraguado de la siguiente forma:

Los cementos con alto contenido en C_3A aseguran la resistencia a corto plazo, así como un fraguado ultra rápido por su instantánea reacción. La norma recomienda utilizar cementos con bajo contenido en C_3A , es decir cementos Resistentes a Sulfatos (SR), que posean más cantidad de silicatos que de C_3A .

-La finura también influye, de forma que cuanto más finas sean las partículas de cemento, existirá más superficie específica para producir la hidratación, reduciéndose también el tiempo de fraguado.

Relación agua/conglomerante

-Para que se inicie la hidratación y el fraguado se necesita una cantidad mínima de agua, que vendrá determinada por la cantidad de cemento. Para conseguir un fraguado rápido será necesaria poca cantidad de agua, es decir una relación agua/conglomerante baja, la mínima para asegurar una consistencia deseada. El empleo de aditivos puede suplir la baja cantidad de agua empleada.

Temperatura

-El aumento de la temperatura de curado provoca un aumento en la velocidad de hidratación de los compuestos, acelerando el fraguado.

La temperatura del ambiente influye significativamente, acelerando el fraguado al aumentar la temperatura hasta los 30°C y disminuyendo el tiempo de fraguado al sobrepasar esa temperatura y al disminuir la temperatura hasta los 0°C que la hidratación parará.

Existencia de adiciones

Las adiciones son materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que pueden añadirse a los hormigones para mejorar algunas de las características físicas y/o químicas de éstos [46]. El principal objetivo de estas adiciones es reducir el contenido de cemento empleado en las mezclas para disminuir la huella de carbono asociada a la generación de cemento, que es el procedimiento más contaminante en la industria constructiva.

La utilización de este tipo de compuestos puede clasificarse en adiciones activas, que son aquellas que tienen actividad puzolánica y reaccionan químicamente (humo de sílice, cenizas volantes, escorias, etc.), y en adiciones inertes, que son aquellas que se emplean como complemento de la curva granulométrica para los tamaños más finos (harina de cuarzo, filler calizo).

-Las adiciones activas provocan modificaciones en la hidratación del cemento, en función de la composición química y del porcentaje de sustitución en el cemento.

-Las adiciones inertes no provocan modificaciones en la hidratación del cemento, rellenando únicamente huecos.

En este proyecto se emplea como adición activa humo de sílice densificado y sin densificar, con el objetivo de que actúe físicamente como plastificante, por su finura y químicamente al provocar un aumento de las resistencias mecánicas de las mezclas. Como adiciones inertes se emplean harina de cuarzo y filler calizo.

Existencia de aditivos

Los aditivos son según J.Calleja [46], productos que se añaden al conglomerante durante su elaboración en las condiciones adecuadas, de forma conveniente y en cantidades precisas con el objetivo de modificar positivamente y con carácter permanente las propiedades del conglomerado, tanto en estado fresco como endurecido. Sobre este tipo de sustancias es importante tener en cuenta varios aspectos:

-El efecto de un mismo aditivo en igual proporción, puede ser distinto en función del tipo de cemento utilizado.

-La cantidad de aditivo empleado es muy importante y no tiene porque tener una relación directa y lineal con el efecto que se desea producir.

-Pueden emplearse aditivos líquidos y en polvo en función de las características y demás aspectos de las mezclas.

-Deben emplearse aditivos de idoneidad reconocida, conforme marca la correspondiente normativa.

-Existen diferentes tipos de aditivos como son: reductores de agua o plastificantes, reductores de agua de alta actividad o súper plastificantes, inclusores de aire, aceleradores de fraguado, aceleradores de endurecimiento, retardadores de fraguado, hidrófugas de masa y multifuncionales.

En este proyecto se emplea un aditivo súper plastificante y varios aditivos aceleradores de fraguado. Por ello, a continuación se comentan algunas características de éstos.

SÚPER PLASTIFICANTES

Se trata de aditivos que tienen como principal objetivo aumentar la trabajabilidad de las mezclas, reduciendo la relación agua/cemento, sin afectar las resistencias ni otras características de los hormigones.

Incrementar el contenido de agua para conseguir mejorar la trabajabilidad repercute negativamente en las resistencias mecánicas, en la durabilidad y en la permeabilidad. Por este motivo, al introducir Súper plastificantes en las mezclas, se consigue reducir la cantidad de agua de amasado hasta el 30%, a diferencia de los plastificantes cuyas reducciones máximas son del 15%. Por ello, utilizándolos se consiguen hormigones de altas resistencias [44].

Como se observa en la imagen 28 [46], las resistencias a compresión de un hormigón con súper plastificante son mayores que las resistencias de un hormigón convencional, ya desde las 4 primeras horas.

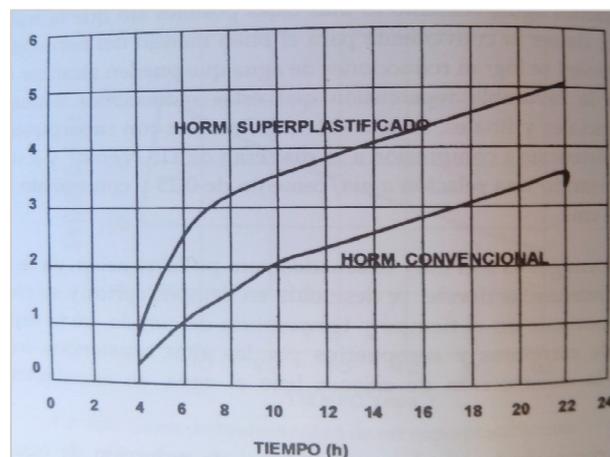


Imagen 28: Mejora de las resistencias a compresión de un hormigón por incorporación de un súper plastificante.

Fuente: [46].

ACELERADORES DE FRAGUADO

Son aditivos que provocan la acción contraria a los retardadores de fraguado. Los aceleradores de fraguado son compuestos que adicionados a las pastas aceleran el fraguado de éstas, actuando sobre el endurecimiento.

Su objetivo, es favorecer la disolución o velocidad de hidratación de los constituyentes anhidros del cemento, provocando una cristalización rápida de silicatos y aluminatos cálcicos de la pasta hidratada.

En la mayor parte de los aceleradores de fraguado pueden encontrarse sustancias como el cloruro sódico, amónico y férrico, bases alcalinas, hidróxidos de sodio, potasio y amonio, carbonatos, silicatos, aluminatos, boratos de sodio o potasio, ácido oxálico, alunita, dietanolamina, etc.

De entre todas ellas, el cloruro de calcio es la sustancia por excelencia, que provoca resistencias iniciales altas y gran liberación de calor en las primeras horas, ya que actúa como catalizador en las reacciones de hidratación del aluminato del cemento, formando la sal de Friedel y acelerando la reacción entre el yeso y el C_3A y el C_4AF [46].

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se desarrolla el procedimiento experimental llevado a cabo en este proyecto para cumplir los objetivos planteados en el capítulo 1. Se van a explicar los materiales, moldes y equipos empleados, la metodología y el programa experimental seguido.

3.1. Materiales utilizados

Los materiales empleados para definir las dosificaciones de hormigón son los siguientes:

1. Cemento.

Conocidos los objetivos del presente proyecto y realizado un gran estudio sobre las dosificaciones de UHPFRC en el Departamento de Ingeniería de la Construcción en el ICITECH de la UPV [20], es importante la elección del tipo de cemento, debido a que la evolución de las resistencias a lo largo del tiempo dependerá de forma directa de esta elección. Además, como ya se ha explicado anteriormente, cuanto mayor contenido en C_3S y C_3A y mayor finura, mayor resistencia del cemento principalmente a corto plazo.

Por todo ello, el cemento utilizado para conseguir los objetivos proviene de LAFARGE ESFERA S.A., es de tipo I, concretamente CEM I, 52'5 R.

2. Agua

El agua empleada proviene de la red de agua potable de la Universidad Politécnica de Valencia, cumpliendo los requisitos que marca la EHE-08.

3. Humo de Sílice (Adición activa)

Se han empleado dos tipologías distintas en función de la dosificación empleada.

Para las mezclas de la dosificación 1, se emplea humo de sílice ELKEM MICROSILICA 940 D (imagen 29). Se trata de humo de sílice densificado, de densidad entre 500 y 700 Kg/m^3 .

Para las mezclas de la dosificación 2, se emplea humo de sílice ELKEM MICROSILICA 940 U (imagen 30). Se trata de humo de sílice sin densificar, de densidad entre 200 y 350 Kg/m^3 .



Imágenes 29 y 30: Humo de sílice densificado (izquierda) y sin densificar (derecha), ELKEM. Fuente: Elaboración propia.

4. Filler Calizo y Harina de Cuarzo (Adición inerte)

La utilización de ambas adiciones permite reducir el contenido de cemento y complementar la curva granulométrica para tamaños pequeños.

Para las mezclas de la dosificación 1, se emplea filler calizo OMNIA.

Para las mezclas de la dosificación 2, se emplea harina de cuarzo US-500 SIBELCO HISPANIA (SIKA), compuesta en más del 90% por sílice cristalina (imagen 31).



Imagen 31: Harina de cuarzo SIBELCO (derecha). Fuente: Elaboración propia.

5. Áridos silíceos

Se emplean áridos silíceos de diferentes tamaños, en función de la dosificación, para aumentar la resistencia mecánica. Las fracciones utilizadas son, la fracción de 1,5 mm, la fracción de 0,8 mm y la fracción de 0,4 mm (imagen 32).

Para las mezclas de la dosificación 1, se emplea las fracciones de 1,5 mm y de 0,4 mm, mientras que para las mezclas de la dosificación 2, se emplean las fracciones de 0,8 mm y 0,4 mm.



Imagen 32: Fracción 1,5 mm, Fracción 0,8 mm y Fracción 0,4 mm (de izquierda a derecha). Fuente: Elaboración propia.

6. Aditivos Súper plastificantes

Para ambas dosificaciones se ha empleado el mismo aditivo súper plastificante en polvo, SIKA VISCOCRETE 225 P (SIKA). Se trata de un súper plastificante en polvo, reductor de agua y con bajo tiempo de absorción, que mejora las características de retracción y fluencia de la mezcla de hormigón (imagen 33).



Imagen 33: Súper plastificante SIKA VISCOCRETE 225 P. Fuente: Elaboración propia.

7. Aditivos Aceleradores de Fraguado

Se utilizan cuatro tipos de aceleradores de fraguado, todos ellos líquidos, para estudiar, en la primera fase de ensayo el comportamiento de las mezclas con todos ellos, para finalmente determinar el súper plastificante que se empleará en la segunda, tercera y cuarta fase de ensayo.

- ISOCRON CENTRAMENT RAPID-500

Aditivo acelerador de endurecimiento con contenido de iones cloruro $< 0,1\%$ en peso, incoloro y con densidad de $1,310 (+- 0,01) \text{ g/cm}^3$ (Imagen 34).

- SIKA SIKASET-3

Aditivo acelerador de fraguado que provoca el aumento de las resistencias iniciales con bajo contenido en iones cloruro ($< 0,01\%$), de color marrón, con densidad a 20°C de $1,25 \text{ Kg/l}$ y PH aproximado de 8 (Imagen 35).

- BASF X SEED-130

Agente activador de la hidratación del cemento para potenciar el desarrollo de resistencias iniciales y finales del hormigón y para proteger al hormigón frente a la corrosión, con bajo contenido en iones cloruro ($< 0,01\%$), de color blanco, con densidad a 20°C de $1,130 (+-0,03) \text{ g/cm}^3$ y PH a 20°C de $11,3 (+-1)$ (Imagen 36).

- IQE AKF-63

Aditivo acelerador de fraguado de tercera generación, de color blanco, libre de álcalis y libremente agresivo para el medio ambiente (Imagen 37).



Imágenes 34, 35, 36 y 37: Aceleradores de fraguado ISOCRON CENTRAMENT RAPID-500, SIKA SIKASET-3, BASF X SEED-130, IQE AKF-63 (de izquierda a derecha). Fuente: Elaboración propia.

8. Fibras de alto límite elástico

Se emplean fibras metálicas, pero únicamente en la cuarta fase de ensayo, que poseen alto límite elástico, longitud de 13 mm y diámetro de 0,20 mm. (Imágenes 38 y 39)



Imágenes 38 y 39: Fibras metálicas empleadas. Fuente: Elaboración propia.

9. Dosificaciones

Las dosificaciones (en gramos/litro), que se van a emplear en este proyecto están basadas en diferentes estudios realizados en el Departamento de Ingeniería de la construcción, concretamente en el ICITECH de la UPV [20] [52].

DOSIFICACION 1		DOSIFICACION 2	
CEM 52,5 R	500	CEM 52,5 R	800
HUMO SIL D.940D	98	MICROSILICE 940U	175
FILLER CALIZO	150	ARINA DE CUARZO US-500	225
FRACCIÓN 1,5 mm	770	FRACCIÓN 1,5 mm	0
FRACCIÓN 0,8 mm	0	FRACCIÓN 0,8 mm	562
FRACCIÓN 0,4 mm	630	FRACCIÓN 0,4 mm	302
AGUA	170	AGUA	170
SUPERPLAST.SIKA 225	4	SUPERPLAST.SIKA 225	10

-La dosificación 1 (D1) está compuesta por menos cantidad de cemento que la dosificación 2 (D2), por humo de sílice densificado y por filler calizo y emplea las fracciones de 1,5 mm y 0,4 mm, mientras que la D2 emplea mayor cantidad de cemento, humo de sílice sin densificar, harina de cuarzo y fracciones de 0,8 mm y 0,4 mm, utilizando ambas dosificaciones la misma cantidad de agua y el mismo tipo de súper plastificante aunque en diferentes proporciones. Como ya se ha comentado anteriormente, el tipo y cantidad de acelerador de fraguado se definirá en las fases de ensayo siguientes.

3.2. Moldes y equipos

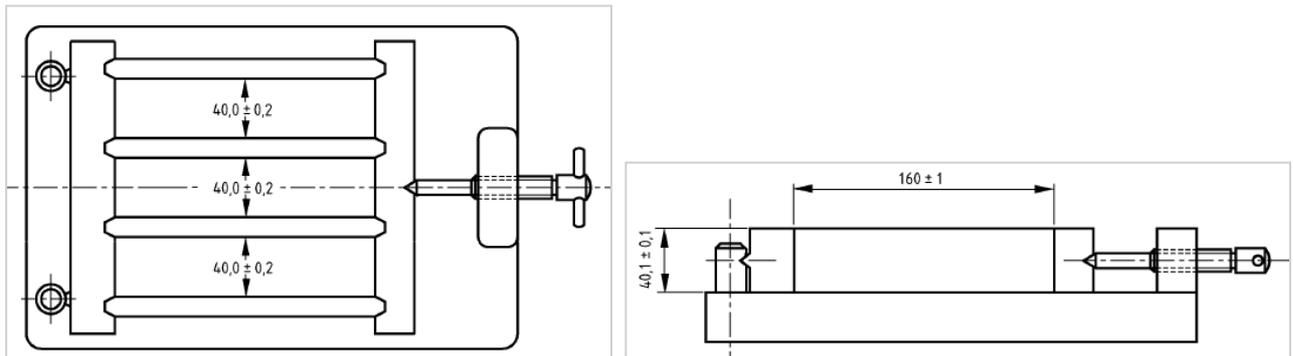
Los moldes o encofrados empleados en las diferentes fases de ensayos son:

-Para determinar el principio de fraguado y la consistencia y trabajabilidad de los diferentes morteros dos tipos de moldes, un molde troncocónico normalizado según indica la normativa española [55] con dimensiones 7 cm de diámetro interior, 8,5 cm de diámetro exterior y 4 cm de altura y un tubo de PVC no normalizado y de dimensiones 3 cm de diámetro y 2,5 cm de altura, como se observa en la imagen 40.



Imagen 40: Molde troncocónico normalizado (izquierda) y tubo de PVC no normalizado (derecha). Fuente: Elaboración propia.

-Para la obtención de probetas de 40 x 40 x 160 mm para su posterior rotura y obtención de resistencias a flexión y compresión, los moldes son los indicados en la normativa española [54], según muestra las imágenes 41 y 42.



Imágenes 41 y 42: Moldes o encofrados con las medidas indicadas. Fuente: Elaboración propia.

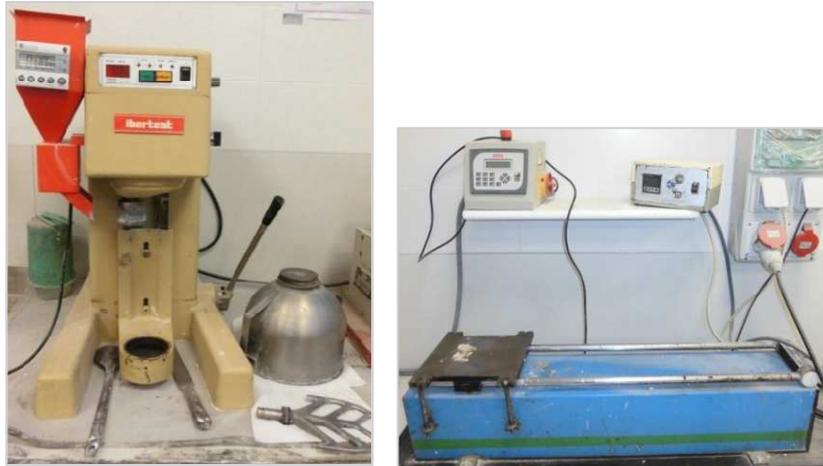
Los equipos utilizados en las diferentes fases de ensayos son:

-El Aparato de Vicat Manual, con las características y dimensiones que indican las normativas españolas [55] [56], para la determinación del tiempo de fraguado, concretamente el inicio del fraguado de las distintas mezclas, según se muestra en las imágenes 43 y 44.



Imágenes 43 y 44: Aparato de Vicat. Fuente: Elaboración propia.

-Amasadora y compactadora típicas, con las características y dimensiones que indica la normativa española [54], utilizadas para la elaboración de probetas de 40 x 40 x 160 mm en los moldes ya comentados anteriormente, según las imágenes 45 y 46.



Imágenes 45 y 46: Amasadora y compactadora típica. Fuente: Elaboración propia.

-Cámara para curado de las probetas, que se encuentra a 20 °C y 100% de humedad, donde se introducen las probetas ejecutadas de dimensiones ya descritas.

-Máquinas de ensayo para determinar las resistencias a flexión y a compresión, de las probetas previamente desencofradas.

Para ensayar las probetas a flexión, se emplea un dispositivo de flexión apropiado que se incorpora a la máquina de ensayos a compresión. Dicho dispositivo se basa en el método de carga de los tres puntos, tal y como indica la normativa [54].

Con las dos mitades obtenidas del prisma, tras la rotura a flexión, se ensayan las probetas a compresión, mediante un dispositivo de compresión apropiado que se incorpora a la máquina de ensayos a compresión, tal y como marca la normativa [54].

En la imagen 47, 48 y 49 puede observarse una máquina de ensayos a compresión, un dispositivo de flexión que se incorpora a la máquina de ensayos a compresión y un dispositivo de compresión que se incorpora a la máquina de ensayos a compresión, respectivamente.



Imágenes 47,48 y 49: Máquina de ensayos a compresión, dispositivo de flexión y dispositivo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Metodología

Como se ha indicado en los objetivos del proyecto en el capítulo 1, se pretende desarrollar mezclas de hormigón que puedan ser proyectables, con elevadas resistencia a edades tempranas, que presenten un fraguado ultrarrápido y con la posibilidad de incorporar fibras.

Para ello, se plantea una metodología concreta, basada en el estudio de la evolución de la trabajabilidad y de las resistencias de las mezclas desarrolladas, siendo el proceso de elaboración de las mezclas el mismo. De este modo, se desarrolla el presente apartado.

- **Elaboración de los morteros**

El procedimiento seguido para la elaboración de los distintos morteros siempre es el mismo y las todas las variables permanecen constantes durante todo el procedimiento experimental, a excepción de la modificación de una variable durante la tercera etapa de ensayos. Así, se describe el procedimiento general seguido para la elaboración de las mezclas:

1. Se vierten todos los materiales en la amasadora, a excepción de los aditivos (súper plastificante y acelerador de fraguado) y el agua, y se mezclan durante 30 segundos.
2. A los 30 segundos, se vierte el agua que se mezcla con el resto de componentes durante 2'5 minutos.
3. Pasados los 2'5 minutos se echa el aditivo súper plastificante que se mezcla con todos los componentes durante un tiempo indeterminado, hasta que la mezcla tenga una consistencia fluida y plástica.
4. En el caso de incorporar fibras, éstas se vierten en la amasadora.
5. Cuando la consistencia es la adecuada se vierte el aditivo acelerador de fraguado.
6. Se mantiene un tiempo de mezclado del acelerador con la mezcla dentro de la amasadora de 1 minuto (a excepción de la tercera fase en la que el tiempo de mezclado se modifica a 20 segundos).
7. Al pasar 1 minuto (o 20 segundos en el caso de la tercera fase), se detiene la amasadora y comienza a contabilizar el tiempo para determinar el momento de levantamiento del molde normalizado o no normalizado, (en función de la fase de ensayo), para ensayar la trabajabilidad.

- **Determinación del tiempo de inicio de fraguado**

Para la determinación del tiempo de fraguado, concretamente el inicio del fraguado de las distintas mezclas, que se desarrolla en la primera fase del programa experimental se toma como referencia dos normativas españolas, la UNE-EN 196-3:2005+A1 "*Métodos de ensayo para cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad en volumen*" [55] y la UNE-EN 480-2:2007 "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación del tiempo de fraguado*" [56]. En ambas normativas, se describe el procedimiento de ensayo, los materiales y el aparato utilizado para la determinación del tiempo de fraguado, diferenciándose entre ellas el valor de referencia de la penetración del Aparato de Vicat.

En este caso, puesto que el objetivo del proyecto es buscar el fraguado ultrarrápido de las mezclas para determinar con precisión el inicio de fraguado, se emplean los equipos ya definidos con anterioridad en el apartado 3.2. (amasadora, molde troncocónico y Aparato de Vicat normalizado), siendo el procedimiento de ensayo distinto a dichas normativas, quedando definido a continuación.

El procedimiento a seguir para determinar el principio de fraguado de cada una de las mezclas consiste en elaborar los morteros, siguiendo el procedimiento anterior, y verterlos posteriormente en el molde troncocónico normalizado para el ensayo de principio y final de fraguado (imagen 50) para situarlo inmediatamente después del vertido en el Aparato de Vicat y comenzar con el proceso de determinación del inicio de fraguado, mediante la Aguja de Vicat.



Imagen 50: Vertido del mortero en molde troncocónico normalizado. Fuente: Elaboración propia.

Vertidas las mezclas en el molde, ya preparadas para la introducción de la Aguja de Vicat, se determina cuando comienza el fraguado de la mezcla en función del aspecto del mortero y de la aguja al salir del molde troncocónico. De esta forma, pueden darse cuatro situaciones tras cada introducción de la Aguja de Vicat en la mezcla:

1. Arrastre de material en la aguja tras la extracción y cierre del hueco generado por la aguja en el mortero. Significa que el fraguado no ha comenzado y la mezcla no tiene suficiente cohesión.
2. Arrastre de material en la aguja tras la extracción y mantenimiento del hueco generado por la aguja en el mortero. Significa que el fraguado está a punto de comenzar y la mezcla está adquiriendo cierta cohesión (Imagen 51).
3. La aguja no arrastra material tras la extracción y se mantiene el hueco generado por la aguja en el mortero. Significa que el fraguado se inicia y la mezcla está adquiriendo cohesión y cierta resistencia conforme avanza el tiempo (Imagen 51).



Imagen 51: Hueco generado en la pasta que indica el inicio de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

4. La aguja no puede penetrar en la mezcla, que ya ha endurecido. Significa que se ha producido el final de fraguado.

De todas estas situaciones, el momento en el cual se mantiene el hueco generado por la aguja en el mortero, es el momento más importante en este caso, por ser el momento de inicio del fraguado y por lo tanto el tiempo en que tardan cada uno de los morteros en comenzar a fraguar.

- **Determinación de la evolución de la trabajabilidad**

Para medir la trabajabilidad de las mezclas, que se desarrolla en las fases 2 y 3 del programa experimental, se toma como referencia dos normativas españolas, la UNE-EN 12350-2:2009 “*Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de Asentamiento*” [57] y la UNE-EN 12350-5:2009 “*Ensayos de hormigón fresco. Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas*” [58]. En ambas normativas, se describen dos métodos de ensayo que se realizan con el hormigón fresco para determinar la consistencia de éste mediante el ensayo de asentamiento y de escurrimiento.

La evolución de la trabajabilidad consiste en medir la evolución del diámetro de la galleta estabilizada al levantar el cono normalizado o no normalizado (en función de la fase), de cada uno de los morteros. Por ello, es importante definir el tiempo exacto en el que se levanta el molde troncocónico normalizado para producirse el escurrimiento.

Dicho tiempo, es una variable definida previamente, que consiste en el periodo desde que se cesa el amasado al parar la amasadora, hasta el momento exacto del levantamiento del cono. Por ello, se establecen unos tiempos concretos que dependerán de la fase del programa experimental. Trascurrido este tiempo se mide el diámetro de la galleta estabilizada en centímetros como se observa en la imagen 52.

Todo ello con el objetivo de observar la disminución o aumento del diámetro de la galleta estabilizada conforme se incrementa el tiempo.



Imagen 52: Galleta estabilizada al levantar el molde. Fuente: Elaboración propia.

- **Determinación de la evolución de las resistencias**

Para obtener las resistencias, en las fases 2, 3 y 4 del programa experimental, se toma como referencia la norma UNE-EN 196-1:2005 “*Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*” [54]. En ésta, se describen los equipos, procedimientos y características para la fabricación de probetas de 40mm x 40 mm x 160mm.

Para estudiar las resistencias de la probetas, las mezclas se elaboran en la amasadora, (según el procedimiento descrito en el apartado anterior “*Elaboración de morteros*” del presente

capítulo), se vierten en los moldes normalizados y se compactan en la compactadora, con 30 golpes exactos, suficientes por la consistencia observada de la mezcla, difiriendo en este punto en la normativa que marca 60 golpes [54].

Se elaboran probetas de 40 x 40 x 160 mm que se compactan con 30 golpes y se introducen en la cámara húmeda (a 20°C y 100% de humedad), lo cual también difiere de la normativa que indica que se deben sumergir las probetas en agua potable [54].

Finalmente se desencofran y preparan las probetas como mínimo 15 minutos antes de realizar los ensayos a flexión y compresión.

Para ensayar las probetas a flexión, tal y como indica la normativa [54], se aplica la carga en mitad del prisma de la rotura (en Newton) y con la distancia entre los soportes (en milímetros) y la medida del lado de la sección cuadrada del prisma (en milímetros), se calcula la Resistencia a flexión (en Megapascales).

Con las dos mitades obtenidas del prisma, tras la rotura a flexión, se ensayan las probetas a compresión, tal y como marca la normativa [54] y se obtiene la resistencia a compresión (en Megapascales) con la carga máxima de rotura (en Newton) y con la superficie de los platos o placas auxiliares (en milímetros cuadrados).

- **Determinación de la cantidad de fibras utilizadas**

En la fase 4, se incorpora una cantidad fija de fibras en las mezclas. Esta cantidad de fibras en peso, que se incorporan en la mezcla se calcula en función del volumen total de la mezcla y de las diferentes densidades (mortero y fibras). El cálculo se realiza del siguiente modo:

→ Con la masa total de la mezcla (2268 gr), suma de todos los componentes (800 gr de cemento, 175 gr de microsilíce, 225 gr de harina de cuarzo, 562 gr de árido medio silíceo, 302 gr de árido fino silíceo, 170 gr de agua, 10 gr de súper plastificante y 24 gr de acelerador de fraguado) y considerando la densidad de la mezcla $2,5 \text{ gr/cm}^3$, se obtiene un volumen total de $907,2 \text{ gr/cm}^3$ ($0,9072 \text{ dm}^3$), resultado de dividir la masa total entre la densidad de la mezcla.

El resultado en volumen se aproxima a 1 dm^3 , y por ello se toma este valor como el volumen total de la mezcla.

→ Al tratarse de fibras metálicas, la cantidad de fibras a incorporar debe estar entre el 1 y el 2% del volumen total de la mezcla, debido a que una cantidad superior al 2% puede dificultar la trabajabilidad y consistencia de las mezclas. Por ello, se adiciona un 2% del volumen total, calculándose la masa total de fibras a incorporar.

Para ello, se calcula el volumen de fibras a incorporar, multiplicando el volumen total de la mezcla (simplificado a 1 dm^3), por el porcentaje de fibras (0,02), obteniéndose un volumen total de fibras de 20 cm^3 .

→ Para calcular la masa total de fibras, se multiplica el volumen total de fibras (20 cm^3) por la densidad de las fibras ($7,81 \text{ gr/cm}^3$ aproximadamente) y se obtiene una cantidad de 156,2 gramos de fibra.

Esta cantidad se aproxima a 160 gramos de fibras, cantidad a incorporar en esta fase de ensayos para obtener las resistencias

3.4. Programa experimental

Teniendo en cuenta los objetivos del proyecto, así como la metodología empleada, este apartado se divide en varias fases, cada una de ellas consecuencia de la anterior, en las cuales se definirá los ensayos realizados, las características y las variables influyentes en cada fase.

3.4.1. Fase 1: Elección acelerador de fraguado

Esta primera fase consiste en elegir el tipo de acelerador de fraguado que más se adapta a los objetivos del proyecto, empleando una de las dos dosificaciones desarrolladas y estudiadas [20] [54].

Concretamente, se emplea la dosificación 1 (D1), (descrita en el apartado 3.1. Materiales utilizados), para realizar diferentes mezclas variando el tipo y la cantidad de acelerador de fraguado (de los cuatro aceleradores de fraguado disponibles).

Para cada uno de los aceleradores de fraguado se emplearán variadas cantidades, al tratarse de diferentes tipos de aceleradores, que poseen efectividades distintas. Por lo tanto, las cantidades de acelerador de fraguado en las mezclas se escogerán con un tanteo previo, al desconocer la eficacia en las mezclas.

Todo ello para determinar **el tiempo del inicio de fraguado** de cada una de las mezclas.

3.4.1.1. Determinación del tiempo de fraguado

La determinación del tiempo de inicio de fraguado se realiza según lo descrito en el apartado de metodología.

Se elaboran diferentes morteros, concretamente 12, incluyendo la pasta control, con diferentes proporciones y tipos de aceleradores de fraguado (SIKA SIKASET-3, IQE AKF-63, ISOCRON CENTRAMENT RAPID-500, BASK X-SEED-130).

En el apartado de Resultados y Discusión que se expone a continuación, se muestran los tiempos de inicio de fraguado de cada una de las mezclas, con la finalidad de escoger el acelerador de fraguado que más se adecua a los objetivos planteados.

3.4.2. Fase 2: Elección de la dosificación y porcentaje de acelerador de fraguado.

Seleccionado el acelerador de fraguado a emplear, según los resultados obtenidos en la primera fase de ensayos, se comienza la segunda fase de ensayos en la cual se realizan diferentes morteros o pastas con las dos dosificaciones planteadas (D1 y D2) con unas cantidades determinadas del acelerador de fraguado seleccionado, para estudiar de forma independiente la evolución de la trabajabilidad y la evolución de la resistencia a corto y largo plazo.

El procedimiento seguido para la elaboración de los distintos morteros siempre es el mismo, permaneciendo todas las variables constantes durante todo el procedimiento experimental, a excepción de la modificación de una variable durante la tercera etapa de ensayos, como ya se ha comentado en el apartado de metodología.

Por lo tanto, se elaboran morteros con las 2 dosificaciones planteadas (D1 y D2) y con diferentes cantidades del acelerador de fraguado seleccionado en la fase anterior, concretamente 0,5%, 1% y 1,5% del peso del cemento (diferente en cada dosificación), para estudiar la evolución de la trabajabilidad y de las resistencias.

3.4.2.1. Evolución de la trabajabilidad

En este caso, para determinar la trabajabilidad y la consistencia se elaboran 38 morteros distintos, con ambas dosificaciones (D1 y D2). Se realizan 8 morteros control, 4 con la dosificación 1(D1) y 4 con la dosificación 2 (D2), 15 morteros para la dosificación 1 (D1) y otros 15 morteros para la dosificación 2 (D2), todos ellos, con diferentes cantidades de aceleradores de fraguado.

Las cantidades de acelerador de fraguado se expresan en porcentaje en función al peso del cemento, que varía en función de la dosificación, siendo para la D1, 500 gr/l y para la D2, 800 gr/l.

Uno de los objetivos de esta fase de ensayo es medir la evolución del diámetro de la galleta estabilizada al levantar el cono normalizado (empleado para el ensayo de principio y final de fraguado, imagen 53), de cada uno de los morteros, como ya se ha desarrollado en el apartado de metodología. Por ello, es importante definir el tiempo exacto en el que se levanta el molde troncocónico normalizado para producirse el escurrimiento.



Imagen 53: Cono normalizado y empleado para el ensayo de principio y final de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

Por ello, se establecen unos tiempos concretos, como son 1, 2, 4 y 6 minutos para los morteros control y 1, 1'5, 2, 3 y 5 minutos para los morteros con acelerador de fraguado. Transcurrido este tiempo se mide el diámetro de la galleta estabilizada en centímetros, para observar la disminución o aumento del diámetro de la galleta estabilizada conforme se incrementa el tiempo.

3.4.2.2. Evolución de las resistencias

Para continuar con el análisis de las mezclas, se evalúan las resistencias de las probetas ejecutadas a corto y largo plazo. Por ello, mediante los equipos y moldes ya descritos, se elaboran probetas de 40 x 40 x 160 mm, conforme indica la metodología.

Preparadas las probetas, se procede primero a ensayar las probetas a flexión y con las dos mitades del prisma obtenidas tras esta rotura se ensayan las probetas a compresión.

De los 38 morteros realizados para evaluar la trabajabilidad, se emplean 36 morteros, 6 morteros control (3 para D1 y 3 para D2) y 30 morteros con diferentes cantidades de acelerador de fraguado (15 para D1 y 15 para D2), y se ensayan de la siguiente forma:

-En los morteros control de ambas dosificaciones se realizan ensayos a 3, 7 y 28 días, al ser pastas sin acelerador de fraguado.

-En los morteros con diferentes cantidades de acelerador de fraguado (0,5%, 1% y 1,5% del peso del cemento) de ambas dosificaciones se realizan ensayos para evaluar las resistencias a corto plazo a 3 y 5 horas y a 3, 7 y 28 días para evaluar las resistencias a largo plazo.

Con los resultados obtenidos con ambas dosificaciones, se escoge aquella dosificación con la que se obtienen los resultados que más se adaptan a los objetivos del proyecto, en cuanto a trabajabilidad y resistencia, para seguir con los ensayos en la siguiente fase, con una única dosificación.

3.4.3. Fase 3: Intervalo de actuación del acelerador de fraguado.

En esta fase, se continúa con la evaluación del desarrollo de la trabajabilidad y consistencia, pero empleando un cono no normalizado, debido a los resultados obtenidos en la fase anterior. También se comprueba la evolución de las resistencias, principalmente a tiempos cortos, diferentes a los tiempos tomados anteriormente. Además, se modifica una de las variables que se había mantenido constante desde el inicio de los ensayos. Todo ello, para comparar los resultados obtenidos.

Para comenzar, se plantea utilizar la dosificación con la que se obtienen mayores resistencias a flexión y compresión en la fase anterior y se incrementa la cantidad del acelerador de fraguado para estudiar la trabajabilidad y las resistencias pero modificando los tiempos de ensayo de los morteros o pastas.

La variable que se modifica es el tiempo de mezclado (dentro de la amasadora) del acelerador de fraguado con el resto del mortero, para analizar si esta variable influye en los resultados obtenidos en cuanto a trabajabilidad y resistencia de las mezclas.

3.4.3.1. Evolución de la trabajabilidad

Para medir la trabajabilidad de los morteros elaborados, se realiza el mismo procedimiento que en la fase anterior pero modificando el molde. En este caso se emplea el molde no normalizado (tubo de PVC de 3 cm de diámetro, imagen 54) descrito anteriormente.

Se realiza esta modificación debido a que el volumen del cono normalizado (empleado anteriormente), es mayor que el deseado, es decir se busca un volumen menor por ser el más semejante a la cantidad de hormigón que se utilizaría con las nuevas técnicas.



Imagen 54: Tubo de PVC no normalizado. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, para determinar la trabajabilidad se realizan 42 ensayos, con la dosificación escogida en la fase anterior. Se realizan 14 pruebas para los morteros control (sin acelerador de fraguado) y 28 pruebas para los morteros con acelerador de fraguado, 14 con 1,5% de acelerador de fraguado y 14 con 3% de acelerador de fraguado. Las cantidades de acelerador de fraguado se expresan en porcentaje en función al peso del cemento.

El objetivo principal de esta fase de ensayo, como en la fase anterior, es medir la evolución del diámetro de la galleta estabilizada al levantar el tubo de PVC no normalizado, donde se encuentra cada mortero. Por ello, es importante definir el tiempo exacto en el que se levanta el molde no normalizado para producirse el escurrimiento.

Por ello, se establecen unos tiempos concretos para los morteros, como son 1 hora 45 minutos, 1 hora 30 minutos, 1 hora 15 minutos, 1 hora 7 minutos, 1 hora, 30, 15, 7, 6, 5, 4, 2 y 1 minutos y 30 segundos para medir el diámetro de la galleta estabilizada en centímetros. Todo ello con el objetivo de observar la disminución, aumento o estabilización del diámetro de la galleta estabilizada conforme se incrementa el tiempo.

3.4.3.2. Evolución de las resistencias

Como en la fase anterior, en esta fase además de trabajabilidad, se analiza la evolución de las resistencias tanto a flexión como a compresión, del mismo modo y siguiendo la misma normativa, metodología, equipamiento y demás procedimientos descritos anteriormente.

De los 42 ensayos realizados para evaluar la trabajabilidad, se emplean 15 morteros para la evaluación de las resistencias, 5 morteros control y 10 morteros con diferentes cantidades de acelerador de fraguado, 5 para 1,5% de acelerador de fraguado y 5 para el 3% de acelerador de fraguado.

A diferencia de la fase anterior, se realiza un análisis más centrado en la evolución de la resistencia a tiempos cortos, debido a los resultados obtenidos anteriormente. Por ello, estos 15 morteros, se ensayan a tiempos cortos, concretamente a 6, 9, 12 y 24 horas y también a 28 días como ensayo a largo tiempo.

3.4.3.3. Tiempo de mezclado del acelerador de fraguado

Además de analizar la trabajabilidad y las resistencias de los morteros, en esta fase, se estudia la influencia de la variable tiempo de mezclado del acelerador de fraguado, dentro de la amasadora, con el resto de la mezcla.

En la metodología, se define esta variable como variable fija, considerándose un tiempo de mezclado de 1 minuto para asegurar la correcta unión de la mezcla, antes de detener la amasadora. Pero, en la fase actual se plantea modificar esta variable de 1 minuto de mezclado a 20 segundos, para evaluar si existen diferencias significativas en mezclas semejantes en cuanto a trabajabilidad y resistencias.

-Para evaluar la **trabajabilidad** se realizan 7 ensayos, con la dosificación escogida y con una cantidad de 3% de acelerador de fraguado.

Estos 7 ensayos se realizan con 20 segundos de tiempo de mezclado y se comparan con 7 de los ensayos realizados en esta misma fase, que consideran 1 minuto de tiempo de mezclado.

Los tiempos establecidos para el levantamiento del tubo desde el momento en que se para la amasadora son 30 segundos, 1, 2, 4, 7, 15 y 30 minutos.

-Para evaluar las **resistencias**, se emplean 5 morteros de los 7 ensayos realizados para evaluar la trabajabilidad, que se han realizado con 20 segundos de tiempo de mezclado.

Los resultados obtenidos al ensayar éstos 5 morteros, se comparan con las 5 mezclas ensayadas anteriormente que se han realizado con 1 minuto de tiempo de mezclado.

De la misma forma que anteriormente, éstos morteros se ensayan a tiempos cortos, concretamente a 6, 9, 12 y 24 horas y también a 28 días como ensayo a largo tiempo.

3.4.4. Fase 4: Incorporación de fibras.

En esta fase se incorpora una cantidad de fibras determinada para evaluar las resistencias a corto y largo plazo. La evaluación de la trabajabilidad no se realiza, como consecuencia de los resultados obtenidos en la fase anterior y descritos posteriormente.

La cantidad de fibras en peso, que se incorporan en la mezcla se calcula en función del volumen total de la mezcla y de las diferentes densidades (mortero y fibras), considerándose esta variable fija. La cantidad de fibras que se incorpora en cada mortero es 160 gramos, como se ha desarrollado en el apartado de metodología.

Se realizan 5 morteros, con las mismas características que en las fases anteriores, con el acelerador de fraguado seleccionado, con un tiempo de mezclado determinado y con 160 gramos de fibras.

Estos 5 morteros con fibras, se comparan con 5 morteros realizados en las fases anteriores, concretamente con los morteros, los cuales no poseen fibras.

De la misma forma que en la fase anterior, se ensayan a tiempos cortos, concretamente a 6, 9, 12 y 24 horas y también a 28 días como ensayo a largo tiempo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

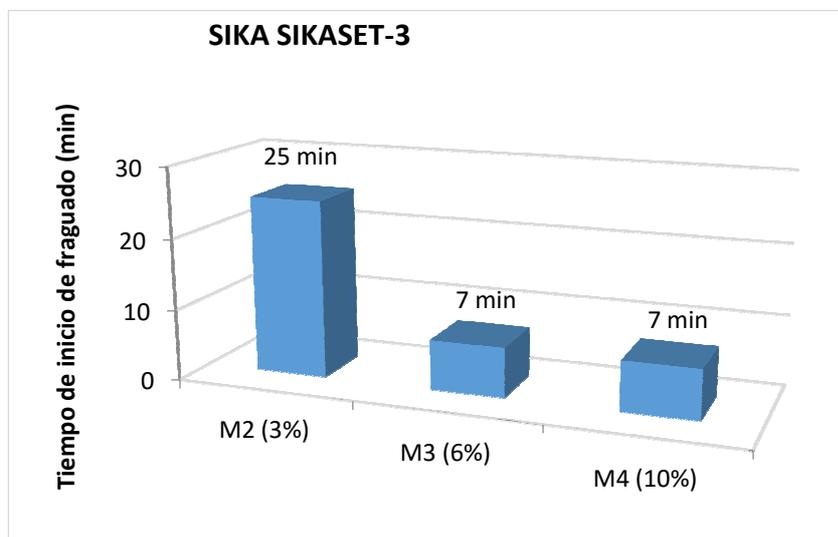
4.1. Fase 1: Elección acelerador de fraguado según los tiempos de inicio de fraguado.

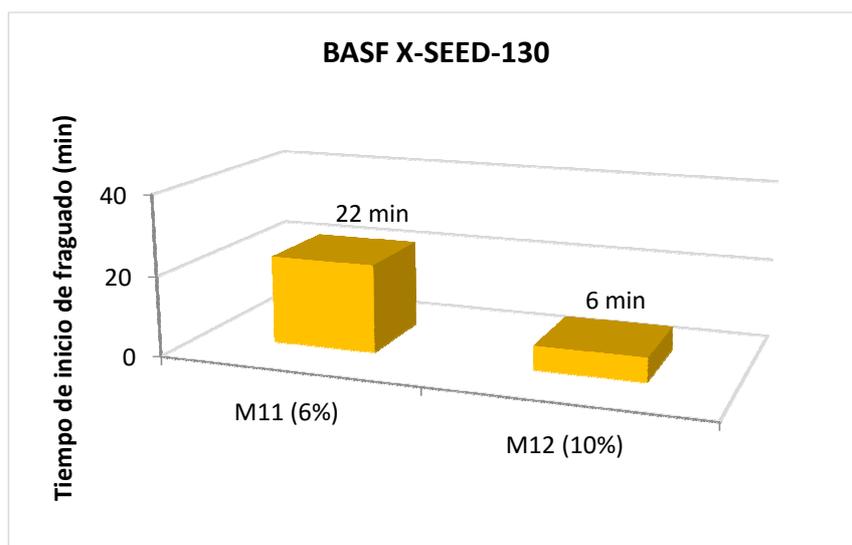
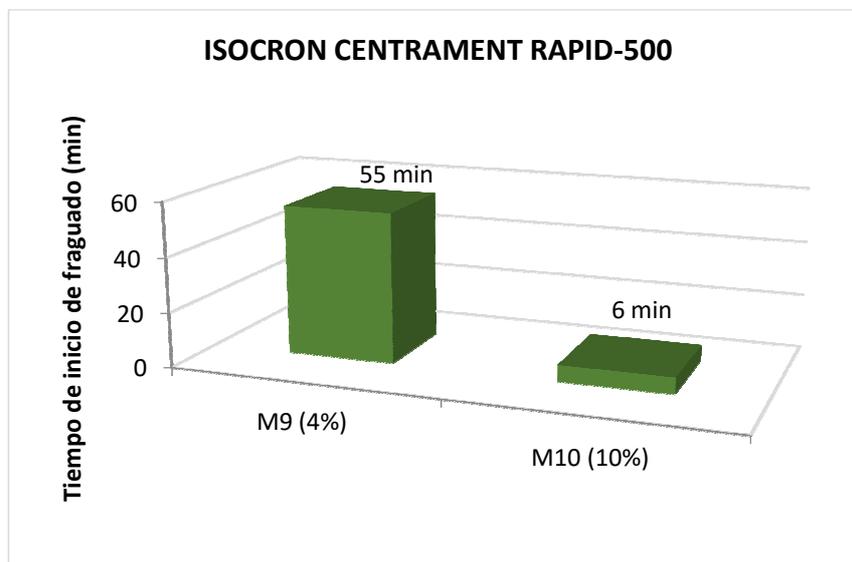
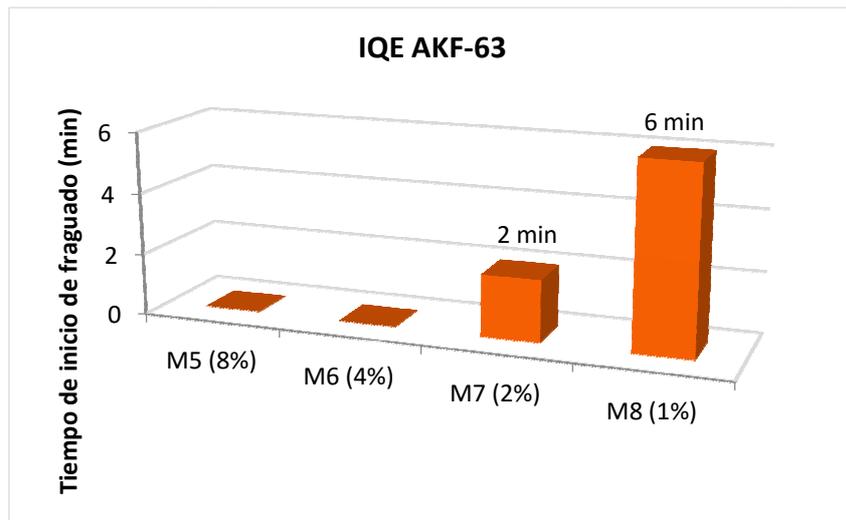
Con los criterios definidos en metodología y en el programa experimental del apartado de procedimiento experimental, se realizan los ensayos con el Aparato de Vicat de los diferentes morteros, para determinar los tiempos en que las diferentes pastas comienzan a fraguar. En la tabla 2 se resumen los distintos morteros formados por diferentes cantidades de cuatro tipos de acelerador de fraguado, con sus correspondientes tiempos de inicio del fraguado.

MORTERO/ MEZCLA (D1)	TIPO ACELERADOR FRAGUADO	CANTIDAD DE ACELERADOR DE FRAGUADO		TIEMPO DE INICIO DE FRAGUADO (min)
		Peso (gr/l)	% peso cemento	
M1	CONTROL	-	-	+ 90
M2	SIKA SIKASET-3	15	3%	25
M3	SIKA SIKASET-3	30	6%	7
M4	SIKA SIKASET-3	50	10%	7
M5	IQE AKF-63	40	8%	-
M6	IQE AKF-63	20	4%	-
M7	IQE AKF-63	10	2%	2
M8	IQE AKF-63	5	1%	6
M9	ISOCRON CENTRAMENT RAPID-500	20	4%	55
M10	ISOCRON CENTRAMENT RAPID-500	50	10%	6
M11	BASF X SEED-130	30	6%	22
M12	BASF X SEED-130	50	10%	6

Tabla 2: Diferentes morteros con diferentes aceleradores de fraguado y tiempo de inicio de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

De forma gráfica, se representan los tiempos de inicio de fraguado de cada uno de los morteros (12 en total). Así, se representará el M2, M3 y M4 del acelerador SIKA SIKASET-3 (gráfico 1), el M5, M6, M7 y M8 del IQE AKF-63 (gráfico 2), el M10 y M11 del ISOCRON CENTRAMENT RAPID-500 (gráfico 3) y el M11 y M12 del BASF X SEED-130 (gráfico 4). El último gráfico (gráfico 5), muestra una visión general de todos los diferentes aceleradores de fraguado con todos los tiempos de inicio de fraguado.





Gráficos 1, 2, 3 y 4: Tiempos de inicio de fraguado con los diferentes aceleradores de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

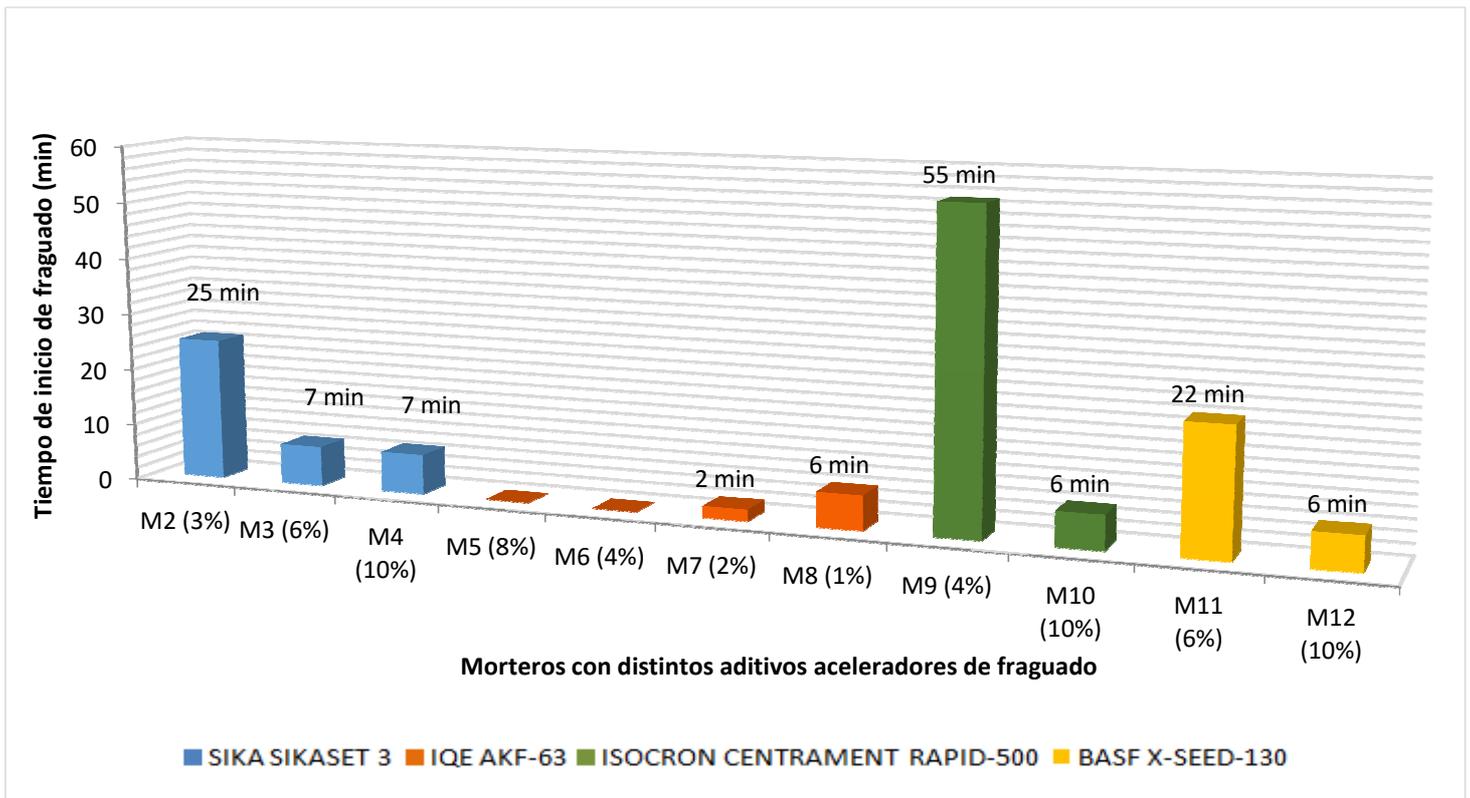


Gráfico 5: Tiempos de inicio de fraguado de los diferentes morteros. Fuente: Elaboración propia.

Las cantidades de acelerador de fraguado son muy dispares, como ya se ha comentado con anterioridad, por ser una fase previa de tanteo al desconocer las efectividades de dichos aceleradores de fraguado.

Como se puede observar en el gráfico 2 y 5, el mortero M5 y M6 formados por el 8% y el 4% del peso del cemento respectivamente (con el acelerador de fraguado IQE AKF-63), no presentan tiempos de inicio de fraguado debido a que esa cantidad de acelerador sobre el peso del cemento es excesiva, lo cual impide que la mezcla tenga trabajabilidad, convirtiéndose en una mezcla de consistencia muy seca.

Con todo ello, según los resultados obtenidos, las mezclas con las que se obtienen menores tiempos de fraguado con baja cantidad de acelerador de fraguado, son aquellas que emplean el acelerador de fraguado **IQE AKF-63** en porcentajes entre el 1 y 2%.

4.2. Fase 2: Elección de la dosificación y porcentaje de acelerador de fraguado según la consistencia y las resistencias.

A partir de los resultados obtenidos en esta fase de ensayos se seleccionará una dosificación, de las dos planteadas (D1 y D2), así como varios porcentajes de acelerador de fraguado escogido anteriormente (IQE AKF-63). Los resultados se presentan a continuación, en función de la evolución de la trabajabilidad y de la evolución de la resistencia a corto y largo plazo.

4.2.1. Resultados de trabajabilidad

Los resultados sobre la trabajabilidad de los morteros se expresan en función del diámetro de la galleta estabilizada tras levantar como normalizado descrito en la normativa [55] [56], tras establecer ciertos tiempos determinados de levantamiento, como ya se ha explicado anteriormente en el apartado de procedimiento experimental.

Se elaboran morteros control (A1-A8) con ambas dosificaciones (D1 y D2), estableciendo ciertos tiempos de levantamiento del cono como muestra la tabla 3 y morteros con diferentes porcentajes de acelerador de fraguado (0'5%, 1% y 1'5% del peso del cemento) (A9-A38) también con ambas dosificaciones y con tiempos de levantamiento del cono que indica la tabla 4. Los resultados de ambos tipos de morteros se observan por separado a continuación.

-Los resultados sobre la trabajabilidad de los morteros control se muestran en la tabla 3 y gráfico 6.

DOSIF.	% ACEL.FRAGUADO	TIEMPO (min)	DIAM. ESTABIL (cm)	MORTERO
D1	0% (CONTROL)	1	18	A1
		2	18	A2
		4	17	A3
		6	16	A4
D2	0% (CONTROL)	1	14,5	A5
		2	13	A6
		4	12	A7
		6	11,5	A8

Tabla 3: D1 y D2 de los morteros control con los tiempos de levantamiento del cono y el diámetro estabilizado para evaluar la trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia.

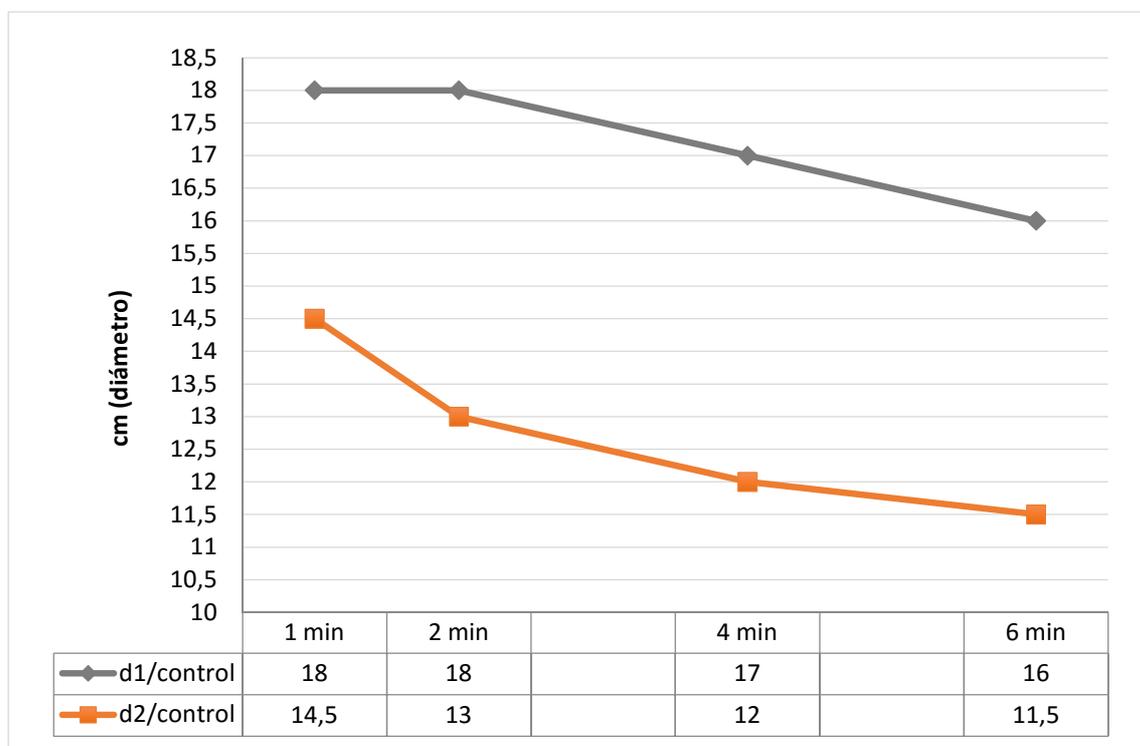


Gráfico 6: Trabajabilidad de las pastas control. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 6, la D1 en toda la evolución presenta mayor diámetro estabilizado (en cm) que la D2. Las curvas de la trabajabilidad definidas tras los resultados obtenidos tienen tendencia a seguir disminuyendo con el tiempo, lo que significa que sigue habiendo escurrimiento y no hay estabilización de la galleta de forma inmediata.

-Los resultados sobre la trabajabilidad de los morteros con diferentes cantidades de acelerador de fraguado control se muestran en la tabla 4 y gráfico 7.

DOSIF.	% ACEL.FRAGUADO	TIEMPO (min)	DIAM. ESTABIL (cm)	MORTERO
D1	0,5% (2,5 gr/l)	1	18	A9
		1,5	18	A10
		2	17	A11
		3	17	A12
		5	15	A13
	1% (5 gr/l)	1	15	A19
		1,5	14	A20
		2	12	A21
		3	12	A22
		5	12	A23
	1,5% (7,5 gr/l)	1	12	A29
		1,5	10,5	A30
		2	10	A31
		3	10	A32
		5	10	A33
D2	0,5% (4 gr/l)	1	12,5	A14
		1,5	11	A15
		2	10,5	A16
		3	10,5	A17
		5	10,5	A18
	1% (8 gr/l)	1	10	A24
		1,5	10	A25
		2	10	A26
		3	10	A27
		5	10	A28
	1,5% (12 gr/l)	1	9	A34
		1,5	8	A35
		2	8	A36
		3	7,5	A37
		5	7,5	A38

Tabla 4: D1 y D2 de los morteros con diferentes porcentajes de acelerador de fraguado, con los tiempos de levantamiento del cono y el diámetro estabilizado para evaluar la trabajabilidad. Fuente: Elaboración propia

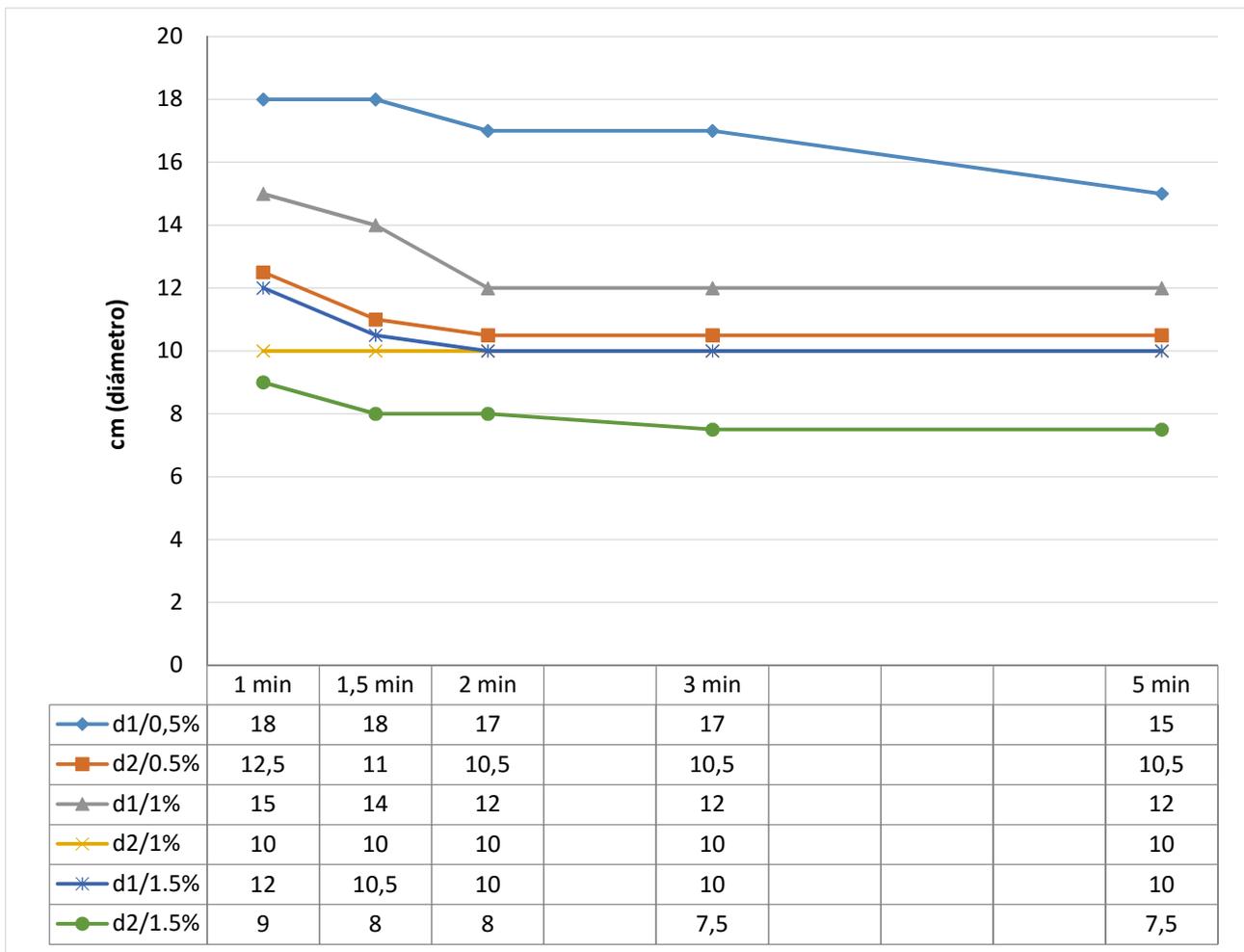


Gráfico 7: Trabajabilidad de las pastas con diferentes porcentajes de acelerador de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

Como ilustra el gráfico 7, las diferentes curvas marcan la tendencia de los morteros a continuar con el escurrimiento, sin una clara estabilización que muestre el inicio del fraguado en pocos minutos.

Además, el gráfico también muestra un mayor escurrimiento en los morteros de la D1, que es mayor cuanto menos cantidad de acelerador de fraguado posea la mezcla. Los morteros con menores escurrimientos son los que poseen mayor cantidad de acelerador de fraguado.

4.2.2. Resultados de resistencias a corto y largo plazo.

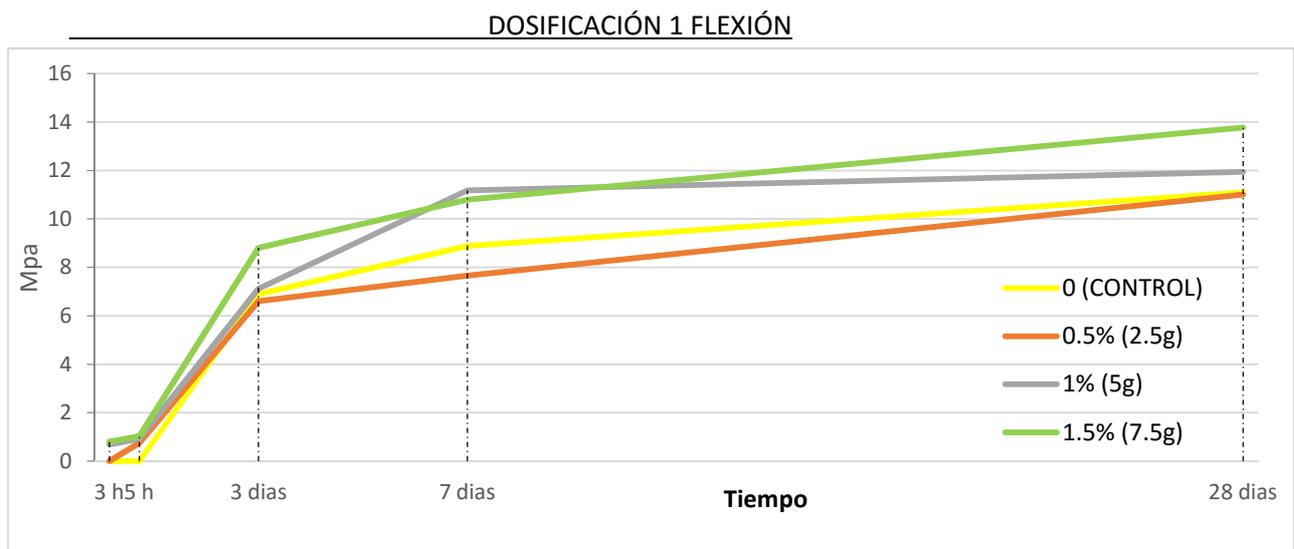
Además de la evaluación de la trabajabilidad, se ensayan las probetas ejecutadas con los morteros anteriores a flexión y compresión, para evaluar las resistencias de las mezclas a corto y largo plazo (3 y 5 horas para corto plazo y 3, 7 y 28 días para largo plazo). Para la obtención de resultados se separan las mezclas en función de las dosificaciones (D1 y D2).

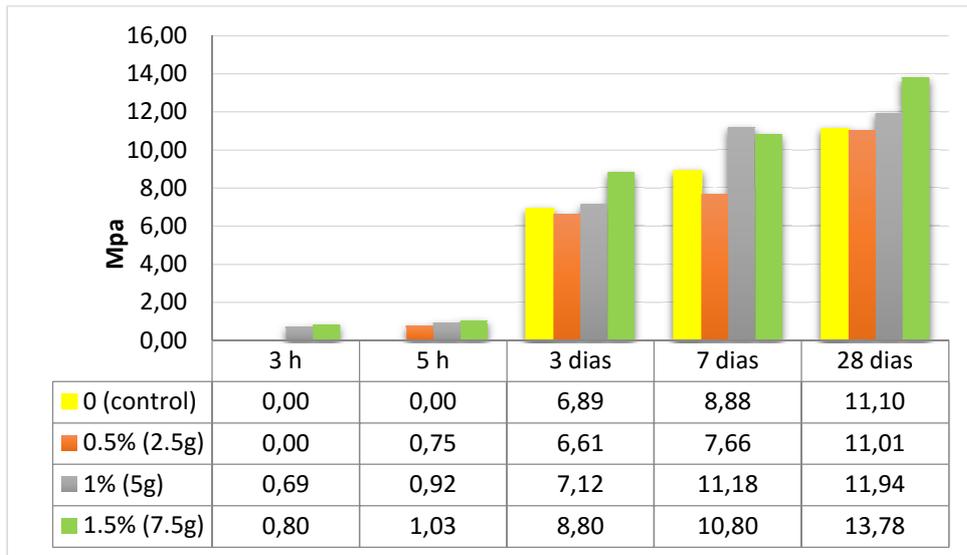
De los 38 morteros realizados anteriormente se emplean 36, 6 para los morteros control (3 para cada dosificación) y 30 morteros para las mezclas con acelerador de fraguado (15 para cada dosificación).

-En primer lugar, se obtiene de la **DOSIFICACIÓN 1**, la evolución de la resistencia a flexión y compresión (en megapascales), resultado de ensayar 3 probetas para cada mortero, con una cantidad total de 18 morteros (3 para pastas control y 15 para pastas con acelerador de fraguado), 54 probetas a ensayar a flexión y 108 medias probetas a ensayar a compresión. Los resultados obtenidos de cada uno de los morteros ensayados tanto a flexión como a compresión es el que muestra la tabla 5 y los gráficos 8, 9, 10 y 11.

DOSIFICACIÓN 1				
% ACEL.FRAGUADO	MORTERO	ENSAYOS	RES.FLEXIÓN(Mpa)	RES.COMPRESIÓN(Mpa)
0% (CONTROL)	M4	3 días	6,89	42,92
	M3	7 días	8,88	48,96
	M5	28 días	11,10	61,05
0,5% (2,5 gr/l)	M12	3 horas	0,00	0,00
	M13	5 horas	0,75	0,78
	M11	3 días	6,61	44,05
	M9	7 días	7,66	50,45
	M10	28 días	11,01	64,62
1% (5 gr/l)	M22	3 horas	0,69	0,53
	M23	5 horas	0,92	0,61
	M21	3 días	7,12	46,70
	M19	7 días	11,18	56,66
	M20	28 días	11,94	70,28
1,5% (7,5 gr/l)	M32	3 horas	0,80	0,78
	M33	5 horas	1,03	1,08
	M31	3 días	8,80	51,96
	M29	7 días	10,80	63,04
	M30	28 días	13,78	74,21

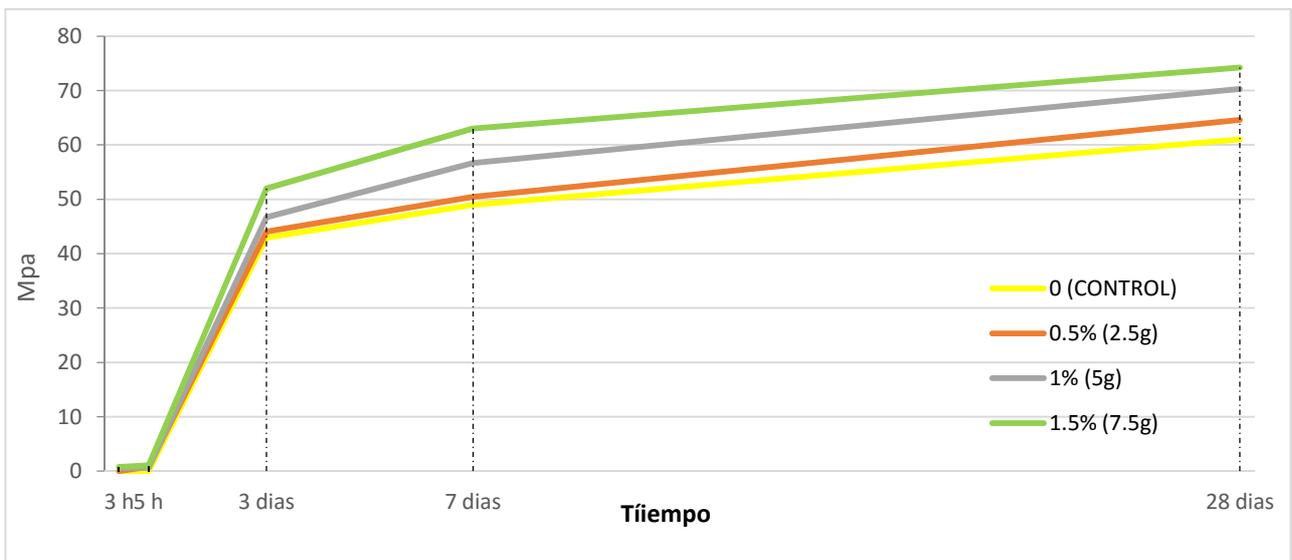
Tabla 5: Resultados de la resistencia a flexión y compresión para la D1. Fuente: Elaboración propia.

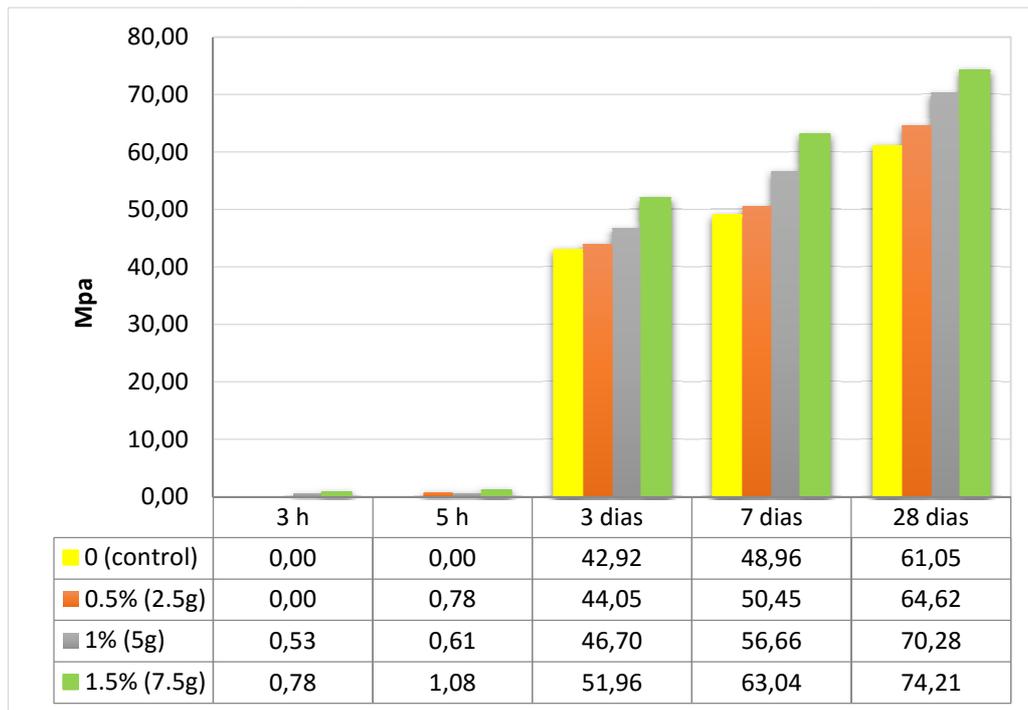




Gráficos 8 y 9: Evolución de las resistencias a flexión para D1. Fuente: Elaboración propia

DOSIFICACIÓN 1 COMPRESIÓN





Gráficos 10 y 11: Evolución de las resistencias a compresión para D1. Fuente: Elaboración propia

Conforme indican los resultados de las gráficas para la D1 a flexión y compresión, al analizar la resistencia a tiempos cortos, se obtienen resistencias, aunque bajas, únicamente en los ensayos a flexión, concretamente en los morteros con 1% y 1,5% de acelerador de fraguado para 3 horas y 0,5%, 1% y 1,5% para 5 horas.

En cuanto a las resistencias a tiempos largos para flexión y compresión, las resistencias aumentan conforme aumenta la cantidad de acelerador de fraguado y el tiempo. Exceptuando en los ensayos a flexión, en los que las mezclas con 0,5% de IQE AKF-63, presentan menores resistencias que la pasta control para todas las edades.

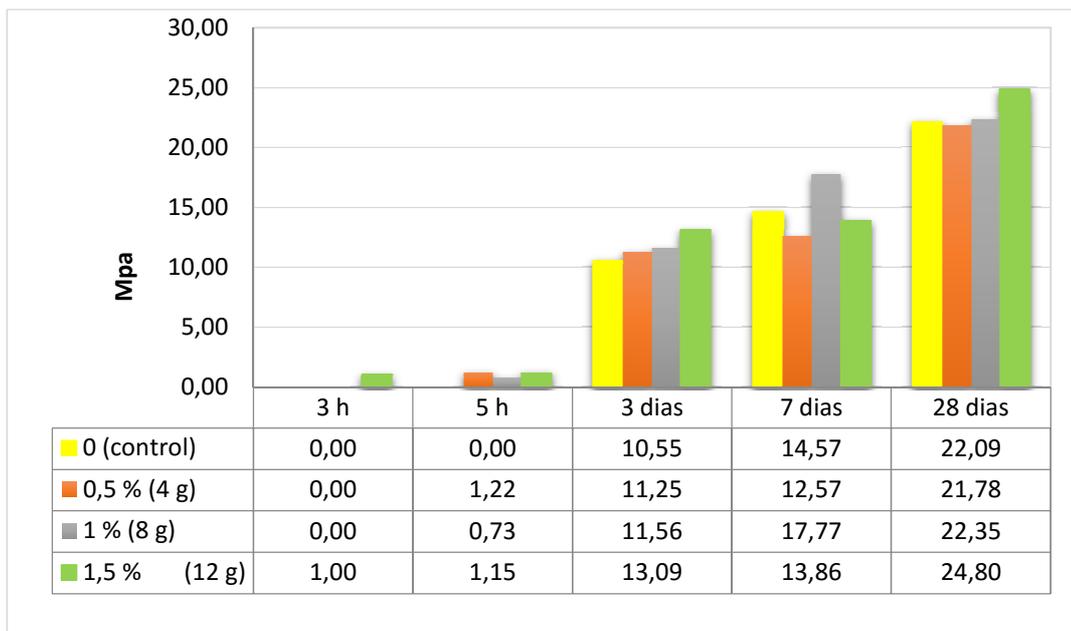
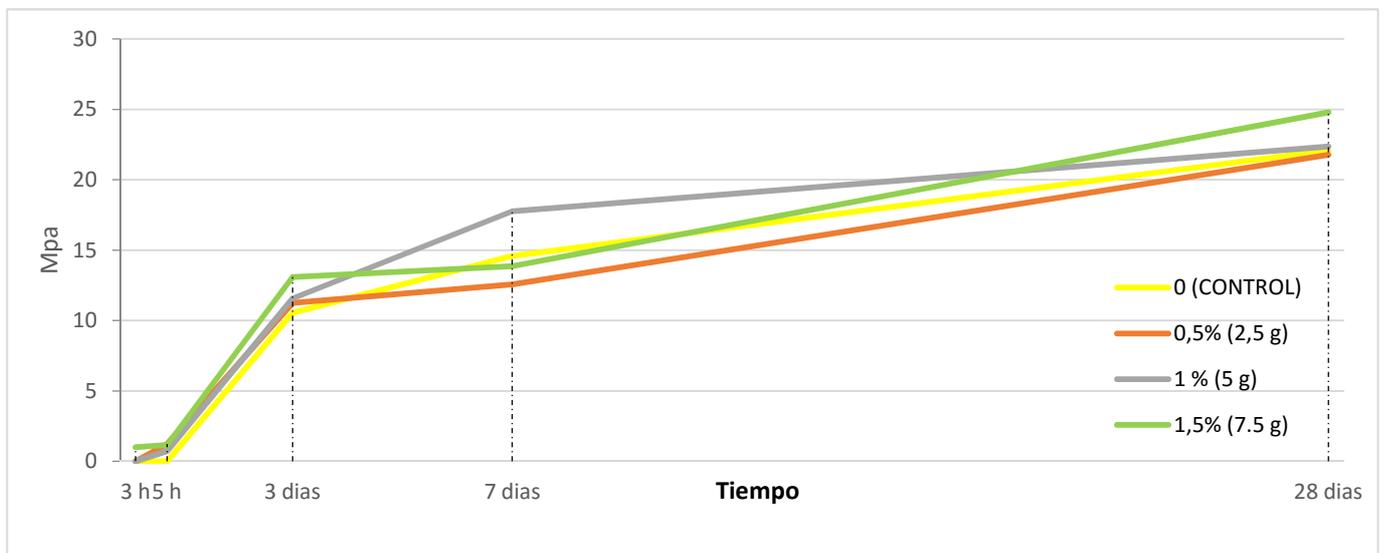
-En segundo lugar, se obtiene de la DOSIFICACIÓN 2, la evolución de la resistencia a flexión y compresión (en mega pascales), resultado de ensayar 3 probetas para cada mortero, con una cantidad total de 18 morteros, 54 probetas a ensayar a flexión y 108 medias probetas a ensayar a compresión, de igual forma que la dosificación 1 ya descrita. Los resultados obtenidos de cada uno de los morteros ensayados tanto a flexión como a compresión es el que muestra la tabla 6 y los gráficos 12, 13, 14 y 15.

DOSIFICACIÓN 2				
% ACEL.FRAGUADO	MORTERO	ENSAYOS	RES.FLEXIÓN(Mpa)	RES.COMPRESIÓN(Mpa)
0% (CONTROL)	M8	3 días	10,55	89,12
	M6	7 días	14,57	103,31
	M7	28 días	22,09	125,77
0,5% (4 gr/l)	M17	3 horas	0,00	0,00
	M18	5 horas	1,23	0,82
	M16	3 días	11,25	95,55
	M14	7 días	12,57	106,17
	M15	28 días	21,78	135,00

1% (8 gr/l)	M27	3 horas	0,00	0,00
	M28	5 horas	0,73	1,65
	M26	3 días	11,56	93,20
	M24	7 días	17,77	106,98
	M25	28 días	22,35	139,80
1,5% (12 gr/l)	M37	3 horas	1,00	1,52
	M38	5 horas	1,15	3,11
	M36	3 días	13,09	93,81
	M34	7 días	13,86	111,78
	M35	28 días	24,80	137,30

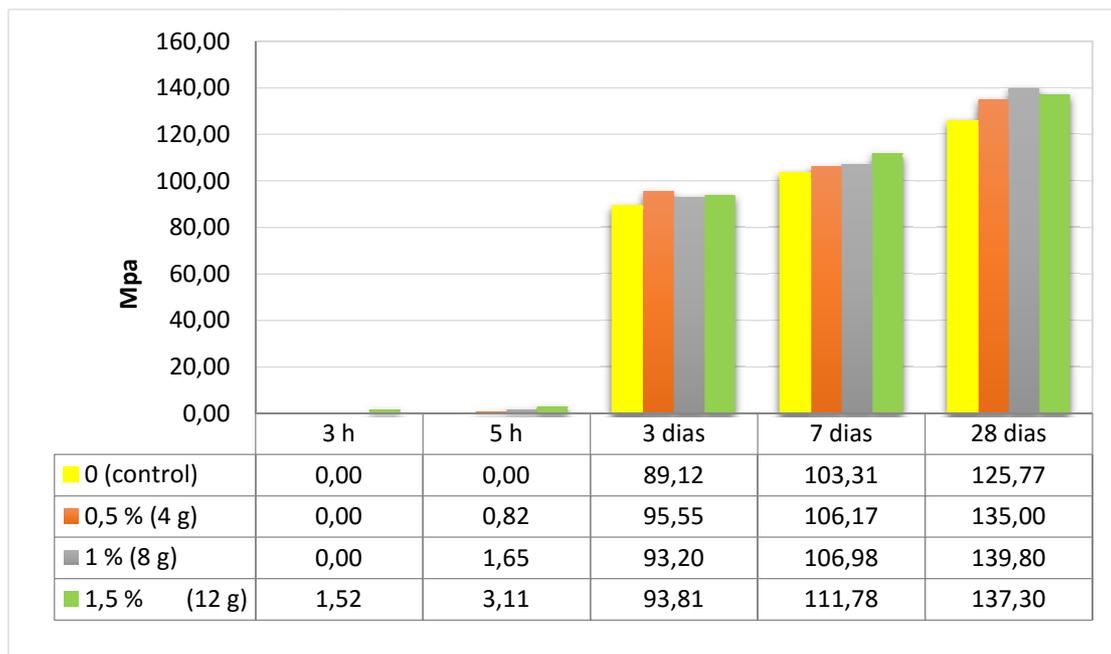
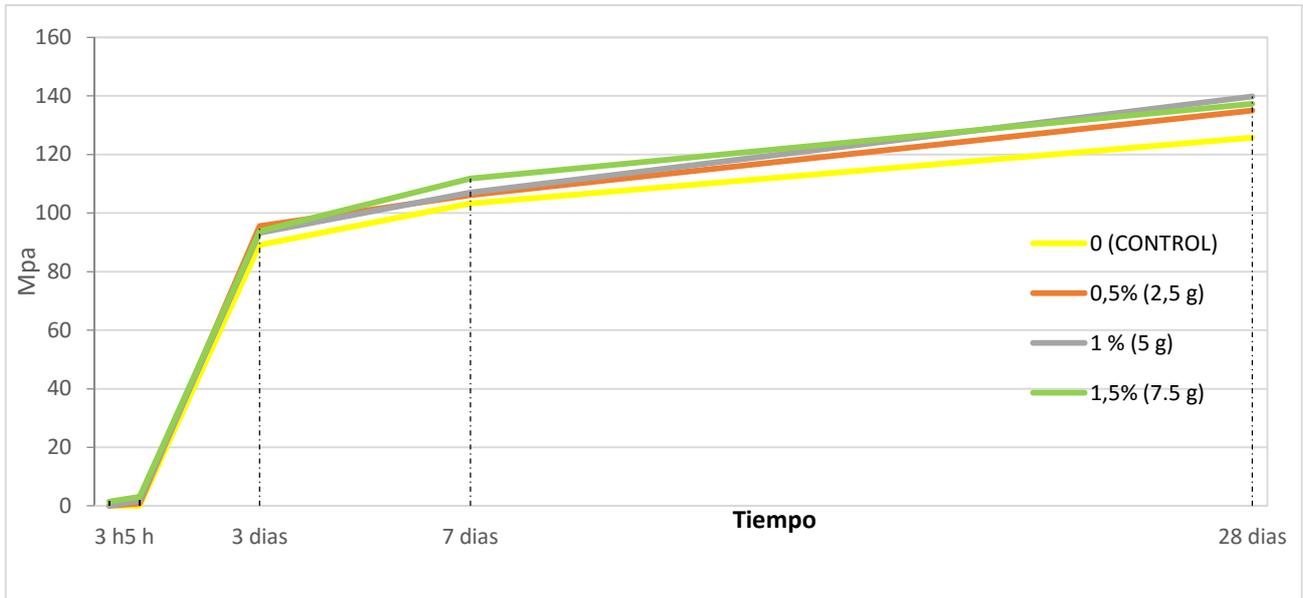
Tabla 6: Resultados de la resistencia a flexión y compresión para la D2. Fuente: Elaboración propia.

DOSIFICACIÓN 2 FLEXIÓN



Gráficos 12 y 13: Evolución de las resistencias a flexión para D2. Fuente: Elaboración propia.

DOSIFICACIÓN 2 COMPRESIÓN



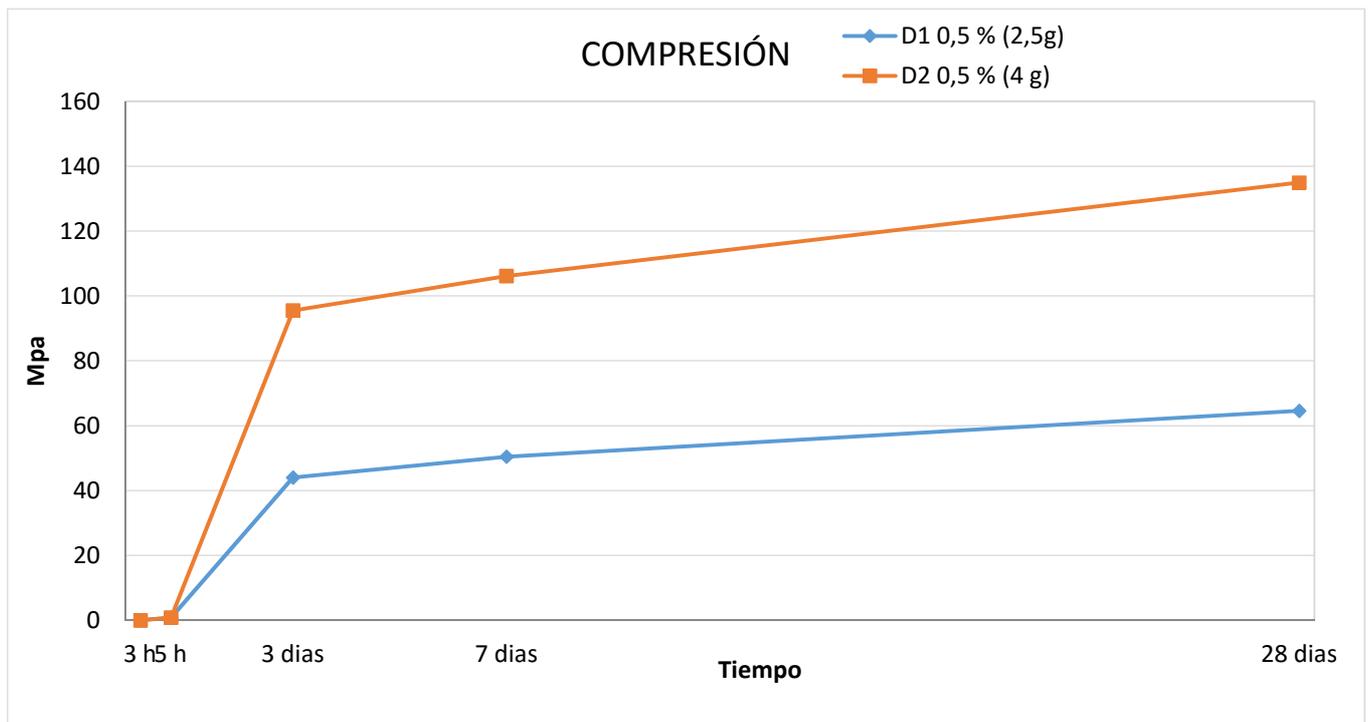
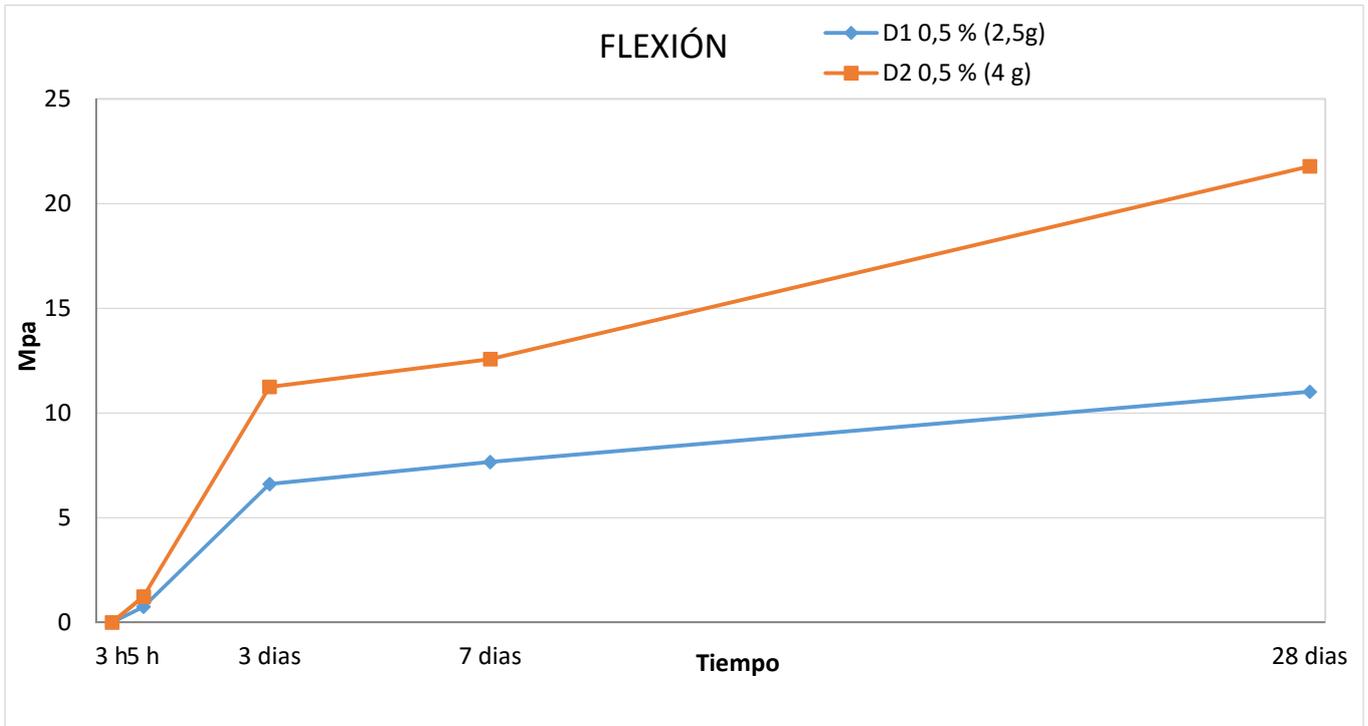
Gráficos 14 y 15: Evolución de las resistencias a compresión para D2. Fuente: Elaboración propia.

Conforme indican los resultados de las gráficas para la D2 a flexión y compresión, al analizar la resistencia a tiempos cortos, se obtienen resistencias, aunque bajas, únicamente en los ensayos a flexión, concretamente en los morteros con 1,5% de acelerador de fraguado para 3 horas y 0,5%, 1% y 1,5% para 5 horas.

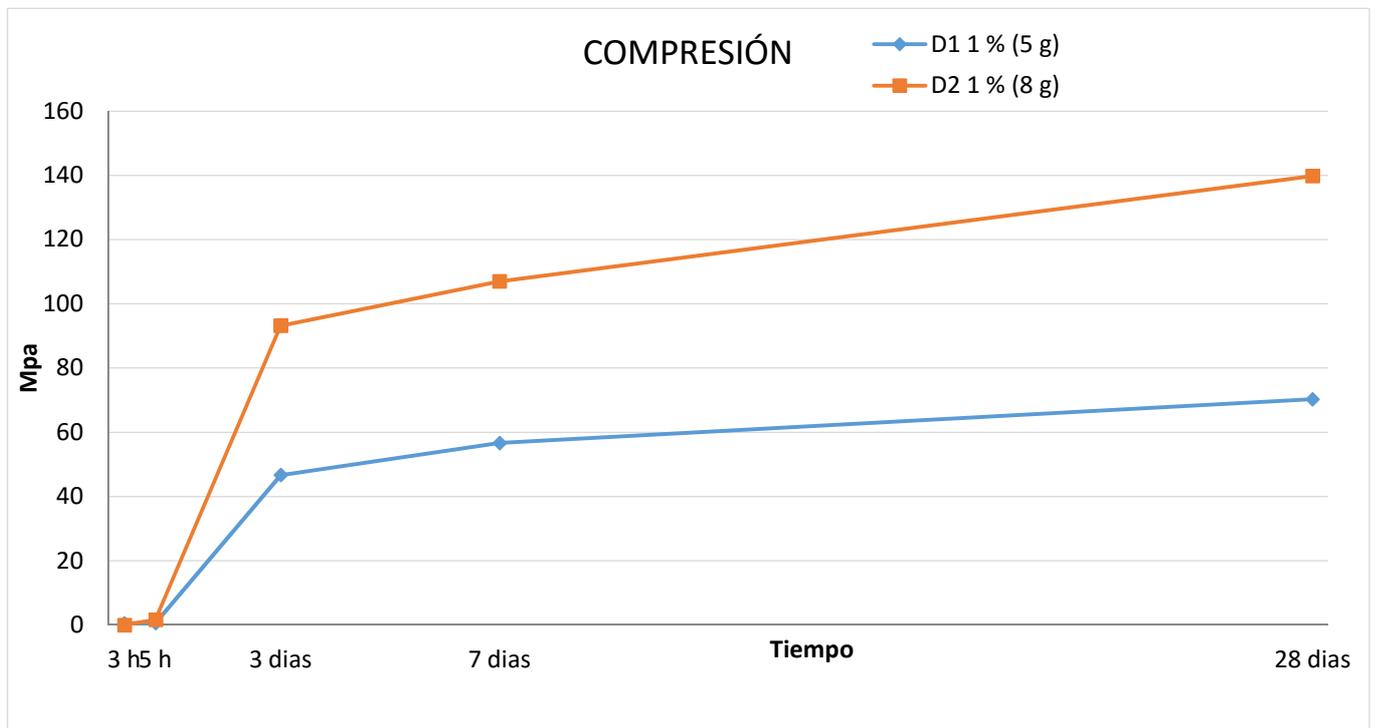
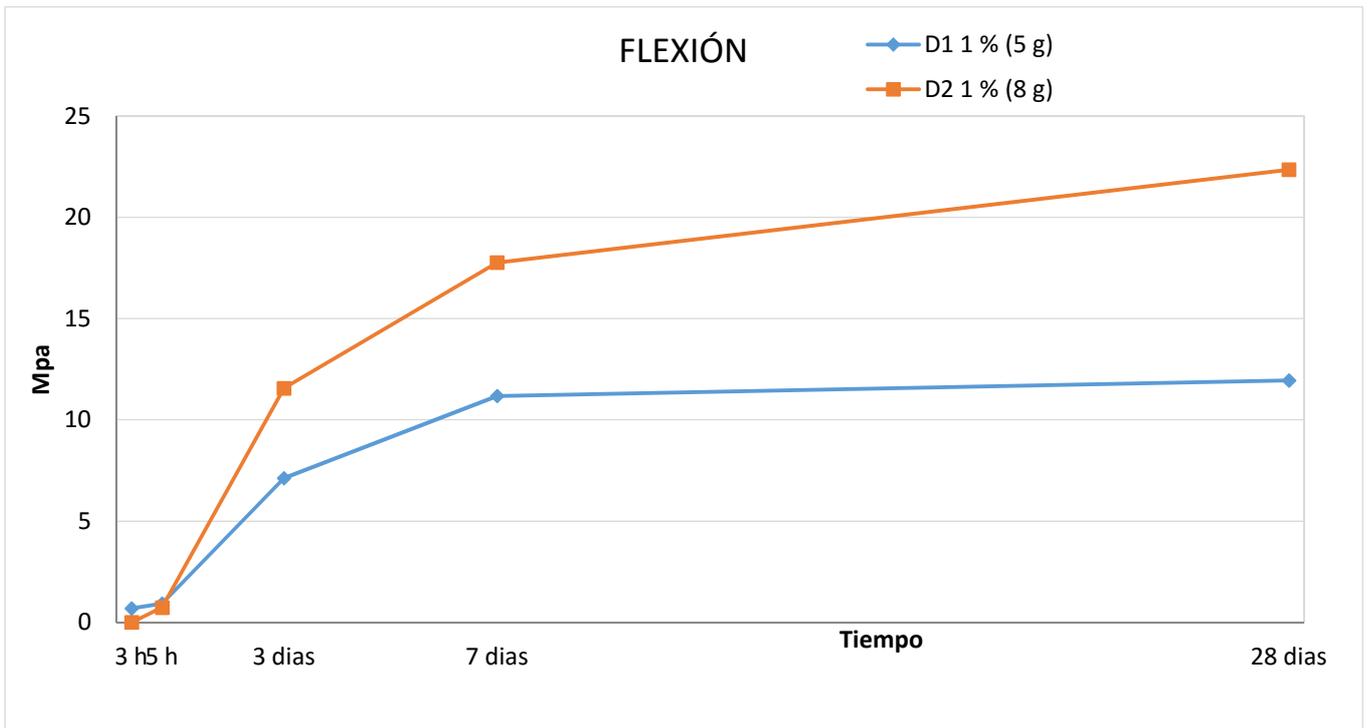
En cuanto a las resistencias a tiempos largos para flexión y compresión, las resistencias aumentan conforme aumentan con el tiempo pero no en todos los casos, el aumento de la cantidad de acelerador provoca un aumento de las resistencias, como sucedía en la D1.

-Por último, se comparan los resultados de ambas dosificaciones (D1 y D2), para cada una de las cantidades utilizadas de acelerador de fraguado (0,5%, 1% y 1,5%) de forma particular y conjuntamente tanto a flexión como a compresión, como se observa en los gráficos 16, 17,18, 19, 20 y 21.

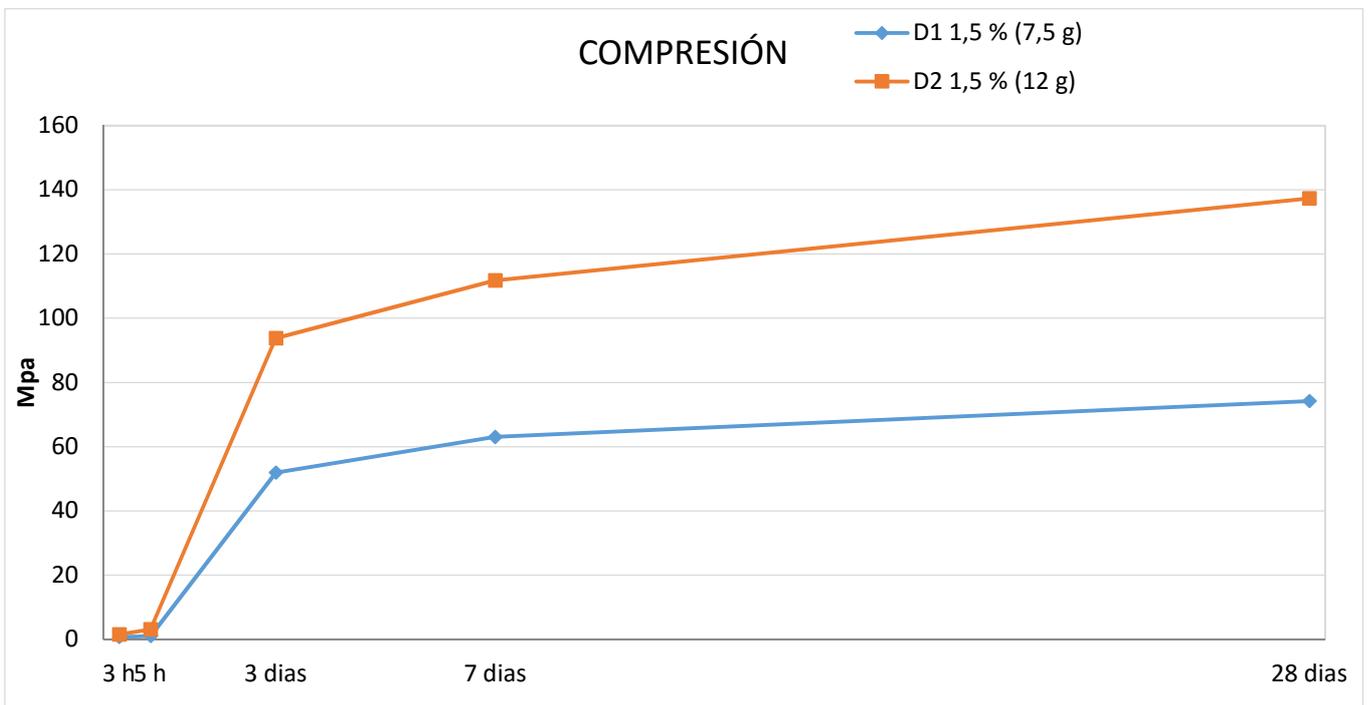
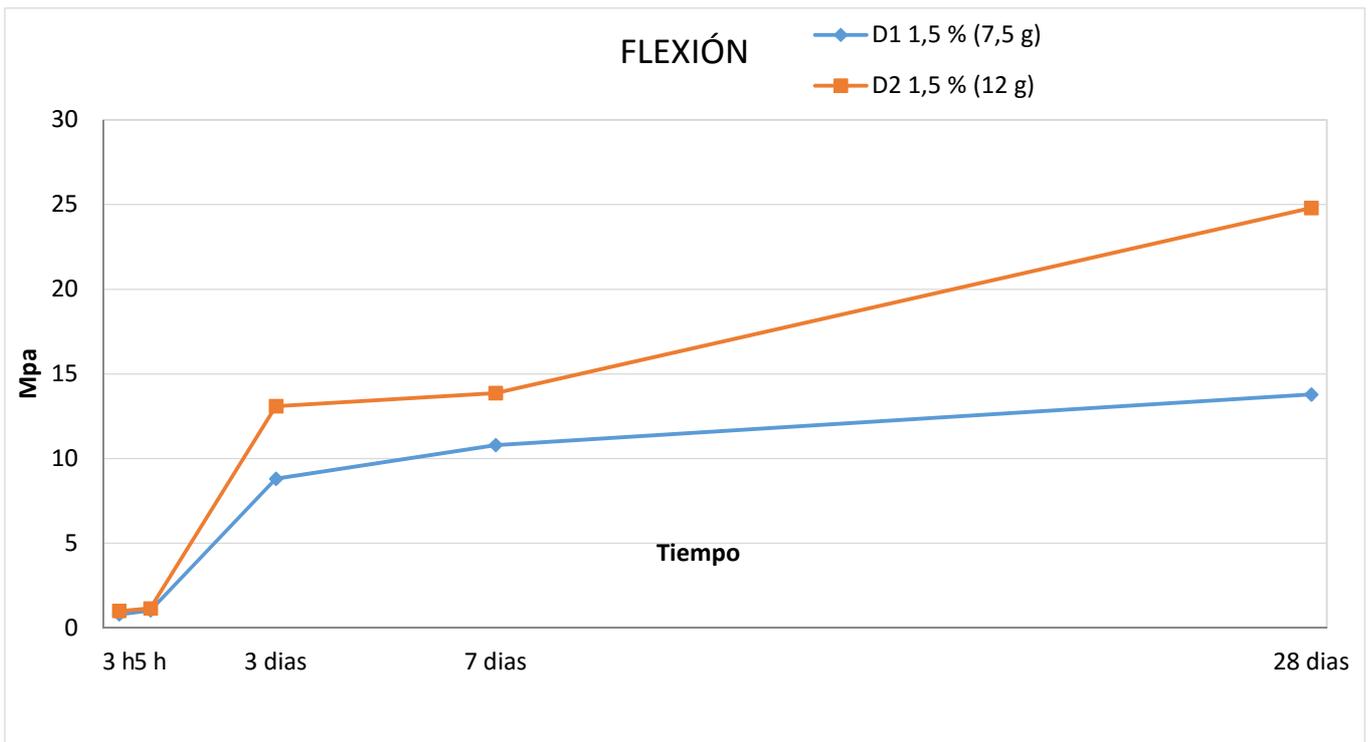
D1 y D2 para 0,5 % de acelerador IQE AKF-63



D1 y D2 para 1 % de acelerador de fraguado IQE AKF-63



D1 y D2 para 1,5 % de acelerador de fraguado IQE AKF-63

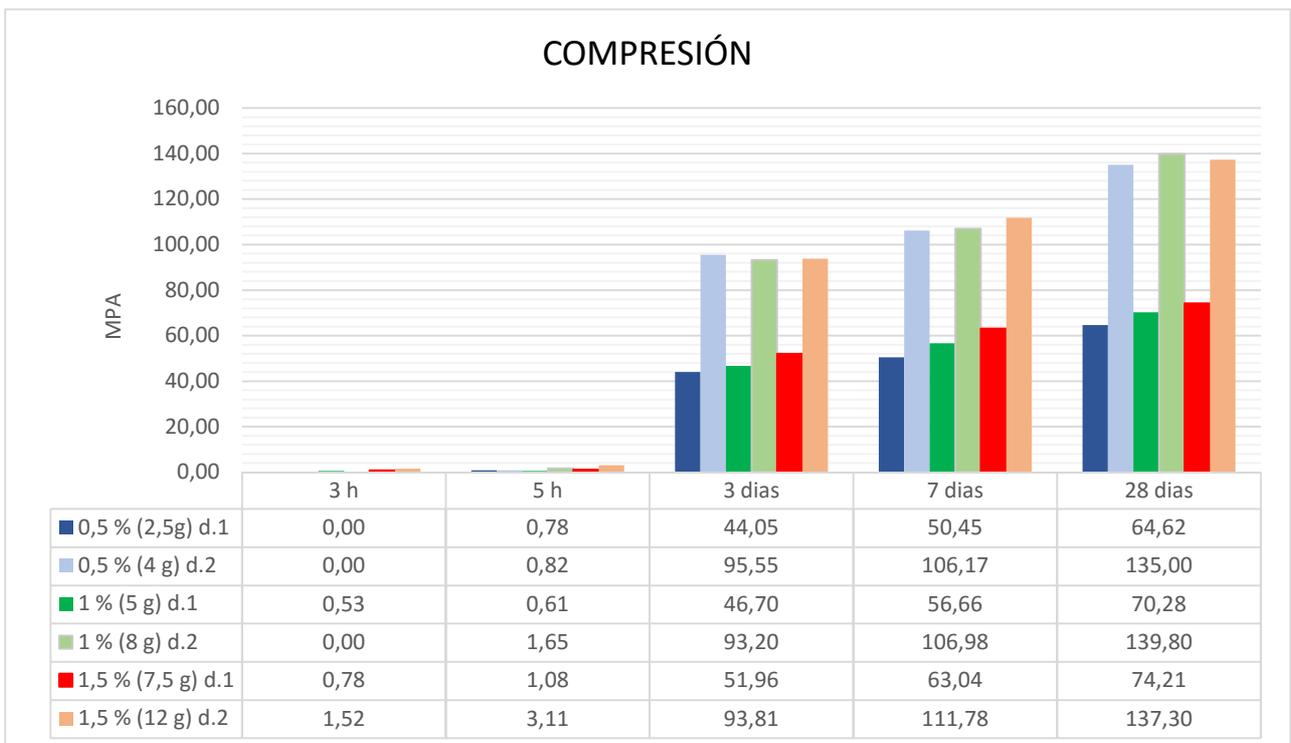
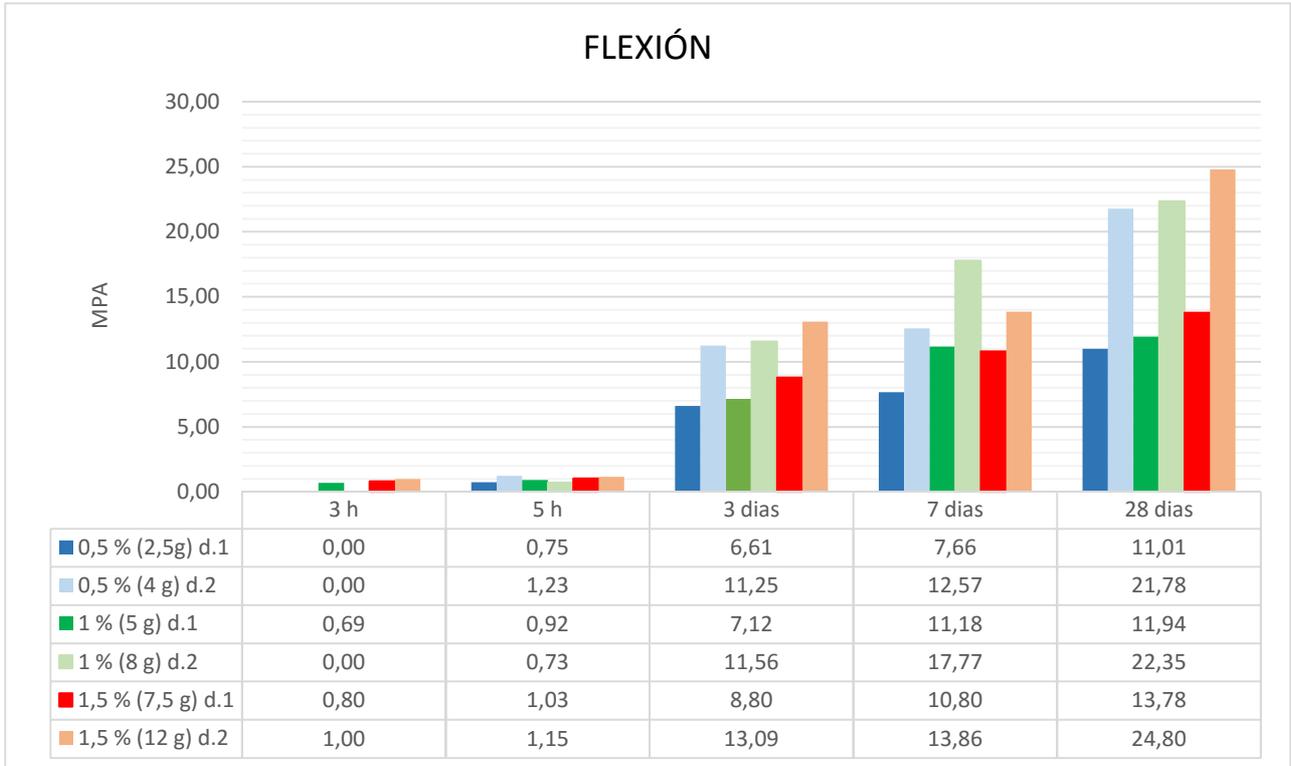


Gráficos 16, 17, 18, 19, 20 y 21: Comparación de D1 y D2 con los diferentes porcentajes de acelerador de fraguado (0,5%, 1% y 1,5%). Fuente: Elaboración propia.

Como se observan en todos los gráficos comparativos a flexión y compresión de las diferentes cantidades de acelerador de fraguado (gráficos 16-21), la D2 presenta mayores resistencias tanto a flexión como a compresión que la D1.

En los gráficos 22 y 23, también se muestra de forma general estos resultados, presentándose los resultados de la D1 en los tonos más oscuros y la D2 en los tonos más claros.

Por este motivo, en la siguiente fase la dosificación a emplear será la D2.



Gráficos 22 y 23: Comparación de D1 y D2 con los diferentes porcentajes de acelerador de fraguado de forma conjunta. Fuente: Elaboración propia.

De forma generalizada para esta fase de ensayos:

-La evolución de la trabajabilidad no es la esperada, debido a la tendencia de las curvas a seguir disminuyendo con el tiempo, es decir, con la continuación del escurrimiento.

-Las resistencias a corto plazo tampoco son las esperadas, por ser prácticamente inexistentes en los ensayos a compresión para ambas dosificaciones.

-Las resistencias a largo plazo si son elevadas y suficientes para los objetivos planteados, sobre todo en la D2, aumentando conforme aumenta el tiempo y la cantidad de acelerador de fraguado, de forma generalizada teniendo en cuenta que la mayor cantidad de IQE AKF-63 es del 1,5% del peso de cemento.

Por ello, se plantea en la siguiente fase:

-En cuanto a la trabajabilidad, utilizar otro equipo para medir la galleta estabilizada al levantar el cono normalizado, debido al excesivo volumen de dicho cono y además cambiar los tiempos del levantamiento del cono.

-En cuanto a las resistencias, aumentar la cantidad de acelerador de fraguado IQE AKF-63, para analizar el crecimiento o decrecimiento de las resistencias a corto plazo y largo plazo, realizando mayor cantidad de ensayos a tiempos cortos y empleando únicamente la D2 por ser la dosificación que más se adapta a los objetivos planteados.

4.3. Fase 3: Intervalo de actuación del acelerador de fraguado.

Con los resultados obtenidos en la fase anterior, se plantea modificar el equipo empleado para evaluar la trabajabilidad y aumentar la cantidad de acelerador de fraguado, fijando un intervalo de actuación, para comparar los resultados y observar la influencia que tiene este aumento en las resistencias a corto y largo plazo.

Además, la variable “Tiempo de mezclado del acelerador de fraguado”, que se ha mantenido constante a 1 minuto en las fases anteriores se modifica a 20 segundos, para evaluar la influencia que tiene dicho cambio en las resistencias.

4.3.1. Resultados de consistencia y trabajabilidad

Los resultados sobre la trabajabilidad y consistencia de los morteros se expresan en función del diámetro de la galleta estabilizada tras levantar el tubo de PVC no normalizado de diámetro 3 cm, tras establecer unos tiempos determinados de levantamiento del cono (descritos en el procedimiento experimental) que se muestran en la tabla 7.

Se emplea la D2, por ser la dosificación que mayores resistencias a flexión y compresión ha ofrecido en la fase previa a esta y se incrementa la cantidad de acelerador de fraguado hasta el 3% del peso del cemento (800 g).

-Se realizan 42 ensayos en total (A1-A42), 14 para las mezclas control, 14 para los morteros con 1,5 % de acelerador de fraguado y 14 para los morteros con 3 % de acelerador de fraguado.

Los resultados sobre los diferentes morteros se muestran en la tabla 7 y gráfico 24.

D2			
% ACEL.FRAGUADO	TIEMPO	DIAM. ESTABIL (cm)	MORTERO
0% (CONTROL)	30 segundos	12	A1
	1 min	11	A2
	2 min	10	A3
	4 min	8	A4
	5 min	8	A5
	6 min	7	A16
	7 min	7	A17
	15 min	6	A18
	30 min	5	A19
	1 hora	4	A20
	1 hora 7 min	4	A21
	1 hora 15 min	4	A22
	1 hora 30 min	0	A23
	1 hora 45 min	0	A24
1,5 % (12 gr/l)	30 segundos	6	A6
	1 min	5	A7
	2 min	5	A8
	4 min	4	A9
	5 min	0	A10
	6 min	0	A25
	7 min	0	A26
	15 min	0	A27
	30 min	0	A28
	1 hora	0	A29
	1 hora 7 min	0	A30
	1 hora 15 min	0	A31
	1 hora 30 min	0	A32
	1 hora 45 min	0	A33
3 % (24 gr/l)	30 segundos	0	A11
	1 min	0	A12
	2 min	0	A13
	4 min	0	A14
	5 min	0	A15
	6 min	0	A34
	7 min	0	A35
	15 min	0	A36
	30 min	0	A37
	1 hora	0	A38
	1 hora 7 min	0	A39
	1 hora 15 min	0	A40
	1 hora 30 min	0	A41
	1 hora 45 min	0	A42

Tabla 7: Tiempos de levantamiento del cono y el diámetro estabilizado para evaluar la trabajabilidad con la D2.

Fuente: Elaboración propia.

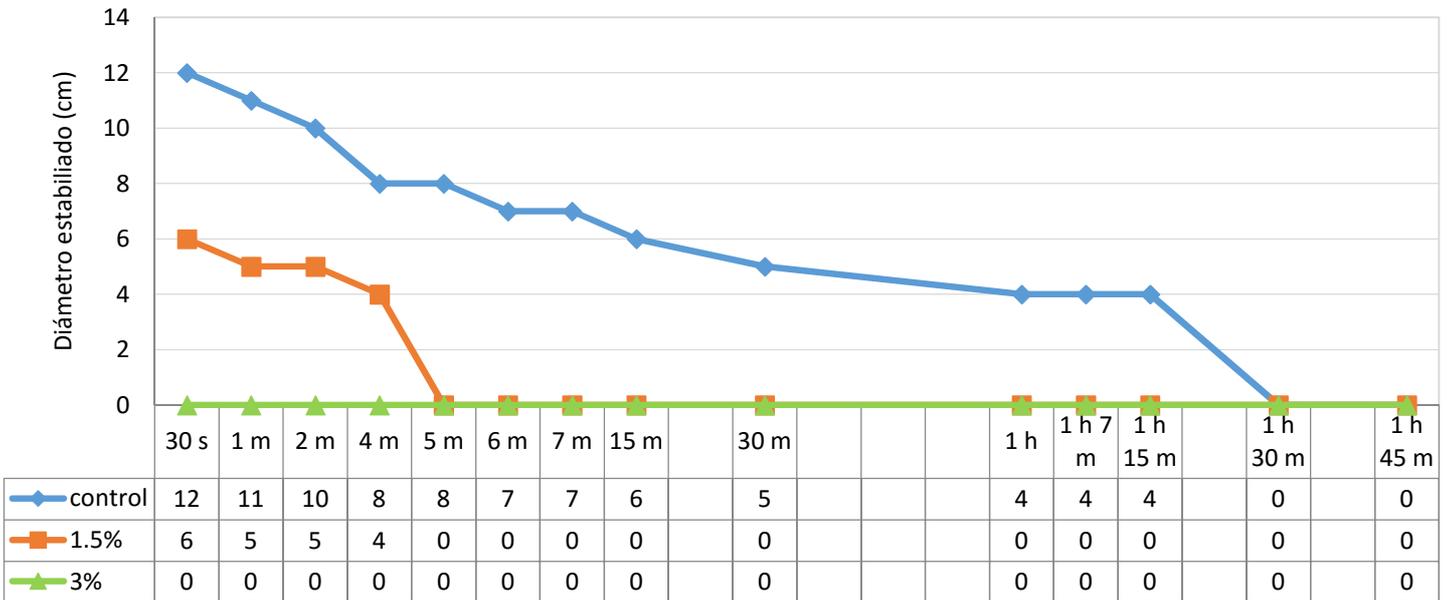


Gráfico 24: Evolución de la trabajabilidad con los diferentes porcentajes de acelerador de fraguado. Fuente: Elaboración propia.

Como ilustra el gráfico 24, las diferentes curvas a excepción del mortero control, no muestran tendencia a continuar con el escurrimiento, a partir de 5 minutos para 1.5% de acelerador de fraguado y a partir de 30 segundos para 3% de acelerador de fraguado

En este caso (3% de acelerador de fraguado), el inicio de fraguado es casi instantáneo y se traduce en 1 minuto y 30 segundos desde el vertido del acelerador en la amasadora (debido a que el tiempo de mezclado no se ha modificado aún y es de 1 minuto, como se ha establecido inicialmente).

Por ello, analizando la trabajabilidad y a falta de conocer los resultados obtenidos en cuanto a las resistencias, la mezcla más óptima para los objetivos del proyecto en cuanto a trabajabilidad, es la compuesta por la D2, con el 3% de acelerador de fraguado IQE AFF-63.

4.3.2. Resultados de resistencias a corto y largo plazo

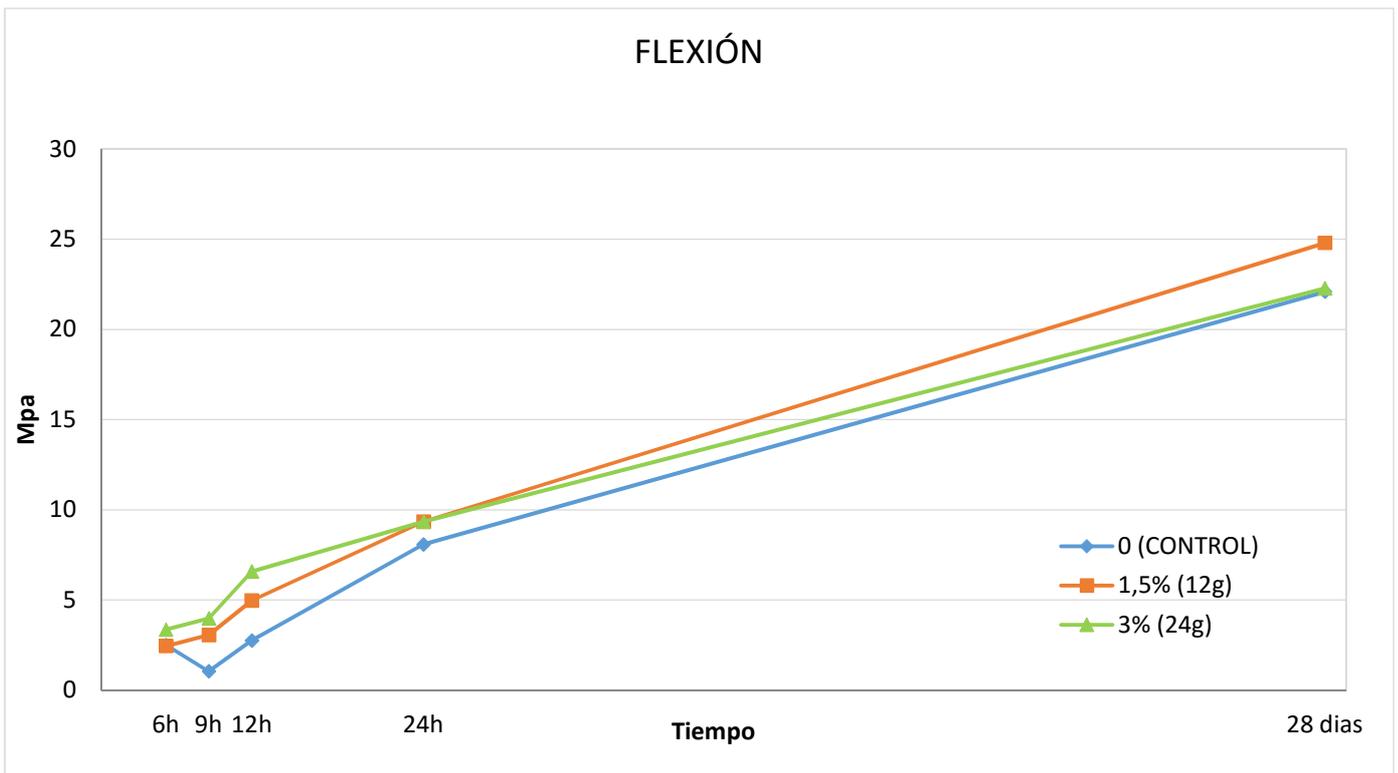
De los 42 ensayos realizados para evaluar la trabajabilidad, se emplean 15 mezclas para ensayar probetas a flexión y compresión y evaluar las resistencias a tiempos cortos de forma más completa que en la fase anterior pero también a tiempos largos.

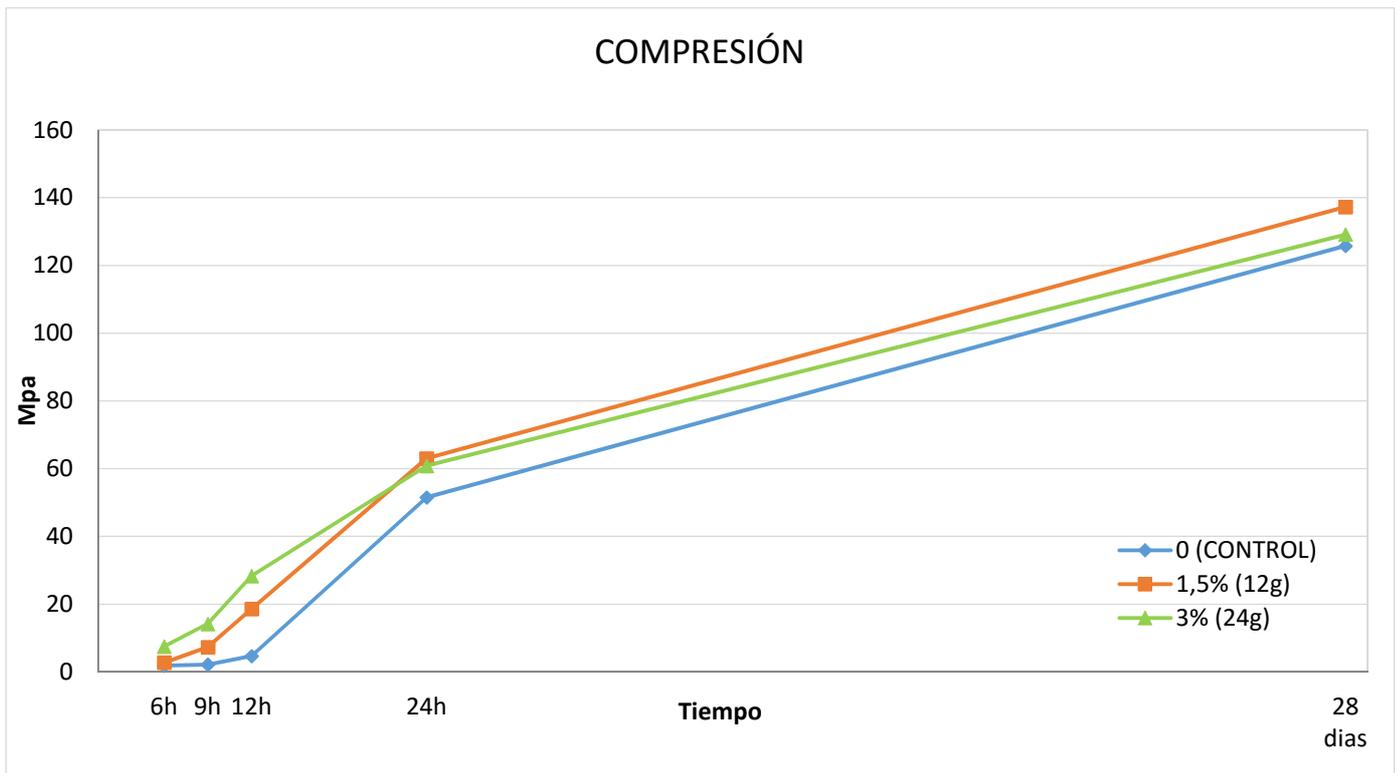
Los ensayos se realizan a 6, 9, 12 y 24 horas y a 28 días. Se realizarán 5 morteros control y 5 morteros con cada uno de los diferentes porcentajes de acelerador de fraguado (1,5% y 3%), ensayándose 3 probetas por mortero, es decir, un total de 45 probetas a flexión y 90 a compresión.

-Los resultados obtenidos se observan en la tabla 8 y en los gráficos 25 y 26.

D2				
% ACEL.FRAGUADO	MORTERO	ENSAYOS	RES.FLEXIÓN(Mpa)	RES.COMPRESIÓN (Mpa)
0% (CONTROL)	A1	6 horas	2,51	1,92
	A2	9 horas	1,05	2,20
	A3	12 horas	2,76	4,70
	A4	24 horas	8,08	51,52
	A5	28 días	22,09	125,77
1,5% (12 gr/l)	A6	6 horas	2,45	2,76
	A7	9 horas	3,06	7,37
	A8	12 horas	4,98	18,58
	A9	24 horas	9,34	63,04
	A10	28 días	24,80	137,30
3% (24 gr/l)	A11	6 horas	3,37	7,49
	A12	9 horas	3,98	14,20
	A13	12 horas	6,58	28,33
	A14	24 horas	9,34	60,84
	A15	28 días	22,28	129,14

Tabla 8: Resultados de la resistencia a flexión y compresión de los diferentes ensayos con diferentes porcentajes de acelerador de fraguado de la D2. Fuente: Elaboración propia.





Gráficos 25 y 26: Evolución de las resistencias a flexión y compresión. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los gráficos 25 y 26, al aumentar la cantidad de acelerador de fraguado al 3%:

-Se produce un aumento de las resistencias a tiempos cortos, sobre todo en las primeras 12 horas.

-A las 24 horas, tanto a flexión como a compresión, las resistencias son similares para 1,5% y 3% de acelerador de fraguado.

-A tiempos largos (28 días), como consecuencia de aumentar la cantidad de acelerador de fraguado, los morteros con 3% de IQE AKF-63, presentan menores resistencias que los morteros con 1,5%, aunque esta disminución de las resistencias no es excesivo, porque consiste en una reducción aproximada del 8% (2 Mpa) a flexión y del 6% (8 Mpa) a compresión, lo cual no es una disminución muy significativa.

Por ello, según los objetivos del proyecto, de conseguir mezclas que presente resistencias a tiempos cortos, fraguado ultra rápido y con consistencia muy concreta y sin escurrimiento, la mezcla que más se adapta a dichos objetivos aunque disminuya de forma poco significativa su resistencia a 28 días, es la formada por la D2, con un 3% de acelerador de fraguado IQE AKF-63.

4.3.3. Resultados sobre el tiempo de mezclado del acelerador de fraguado

Como ya se ha explicado anteriormente, la variable tiempo de mezclado del acelerador de fraguado IQE AKF-63, con el resto de componentes dentro de la amasadora se ha estado considerando en todas las fases anteriores una variable fija, determinándose 1 minuto de

tiempo de mezclado. Pero, en esta fase se modifica a 20 segundos para estudiar la influencia en la trabajabilidad y en las resistencias.

-Para evaluar la TRABAJABILIDAD se realizan 7 ensayos con un tiempo de mezclado de 20 segundos (A43-A49), con la dosificación escogida y con una cantidad de 3% de acelerador de fraguado.

Estos ensayos se comparan con 7 de los ensayos realizados anteriormente (con un tiempo de mezclado de 1 minuto) para evaluar la trabajabilidad de en esta misma fase, concretamente con los morteros A11, A12, A13, A14, A35, A36 y A37. En la tabla 9, se definen los tiempos establecidos para el levantamiento del tubo desde el momento en que se detiene la amasadora (tiempo ensayo) y el diámetro de la galleta estabilizada para cada uno de los tiempos.

D2				
% ACEL. FRAGUADO	TIEMPO MEZCLADO	TIEMPO ENSAYO	DIAM. ESTABIL (cm)	MORTERO
3 % (24 gr/l)	20 segundos	30 segundos	0	A43
		1 min	0	A44
		2 min	0	A45
		4 min	0	A46
		7 min	0	A47
		15 min	0	A48
		30 min	0	A49
	1 minuto	30 segundos	0	A11
		1 min	0	A12
		2 min	0	A13
		4 min	0	A14
		7 min	0	A35
		15 min	0	A36
		30 min	0	A37

Tabla 9: Resultados de la trabajabilidad variando el tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.

Sin necesidad de representación gráfica, tal y como se observa en la tabla 18 sobre la trabajabilidad, no existe ninguna diferencia entre los morteros elaborados con un tiempo de mezclado de 1 minuto y los elaborados con 20 segundos de mezclado. En ambos casos, no se puede medir el escurrimiento, debido a que el inicio de fraguado es prácticamente instantáneo.

En los morteros con 20 segundos de mezclado, el tiempo en que comienza el fraguado desde el vertido del acelerador de fraguado en la amasadora, es de aproximadamente 50 segundos (20 segundos de tiempo de mezclado y 30 segundos desde el momento de parar la amasadora hasta el levantamiento del tubo de PVC no normalizado).

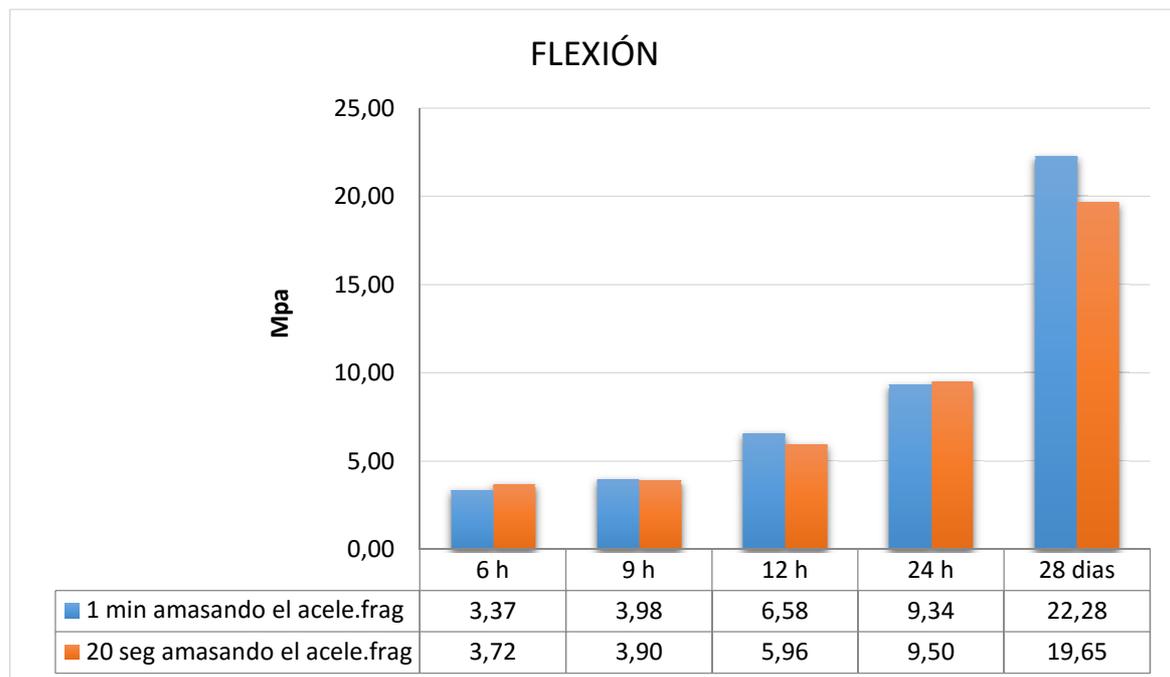
-Para evaluar las RESISTENCIAS, se emplean 5 morteros de los 7 ensayos realizados con 20 segundos de tiempo de mezclado para evaluar la trabajabilidad, (A43-A47).

Los resultados obtenidos al ensayar éstos 5 morteros, se comparan con las 5 mezclas ensayadas anteriormente que se han realizado con 1 minuto de tiempo de mezclado (A11-A15), como puede observarse en la tabla 10.

De cada uno de los 5 morteros se obtienen 3 probetas, ensayándose un total de 15 probetas a flexión y 30 a compresión. Como ya se ha explicado, éstos morteros se ensayan a tiempos cortos, concretamente a 6, 9, 12 y 24 horas y también a 28 días como ensayo a largo tiempo, obteniéndose los resultados de los gráficos 27 y 28.

D2					
% ACEL. FRAGUADO	TIEMPO MEZCLADO	MORTERO	ENSAYOS	RES.FLEXIÓN(Mpa)	RES.COMPRESIÓN (Mpa)
3 % (24 gr/l)	20 segundos	A43	6 horas	3,72	7,03
		A44	9 horas	3,90	16,13
		A45	12 horas	5,96	28,02
		A46	24 horas	9,50	57,12
		A47	28 días	19,65	130,03
	1 minuto	A11	6 horas	3,37	7,49
		A12	9 horas	3,98	14,20
		A13	12 horas	6,58	28,33
		A14	24 horas	9,34	60,84
		A15	28 días	22,28	129,14

Tabla 10: Resultados de la trabajabilidad variando el tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.



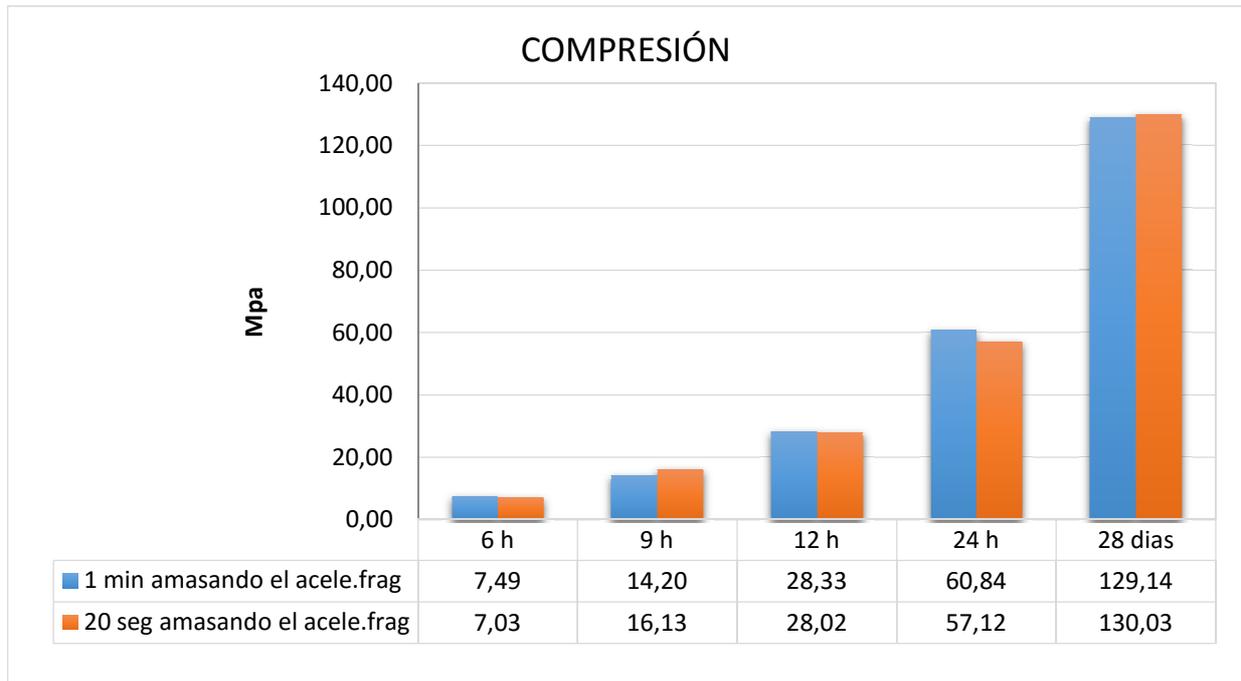


Gráfico 27 y 28: Evolución de las resistencias en función del tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en los gráficos 27 y 28, tanto en las resistencias a flexión como a compresión, no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos al variar la variable tiempo de mezclado del acelerador de fraguado IQE AKF-63 con la mezcla, dentro de la amasadora.

Esto significa que utilizando menos tiempo en la elaboración de la mezcla se obtienen resistencias adecuadas, siendo la variable “Tiempo de mezclado” no influyente en la trabajabilidad y en las resistencias de los morteros en el rango estudiado. Por lo tanto, la modificación de esta variable de 1 minuto a 20 segundos no influye en las mezclas realizadas.

4.4. Fase 4: Incorporación de fibras.

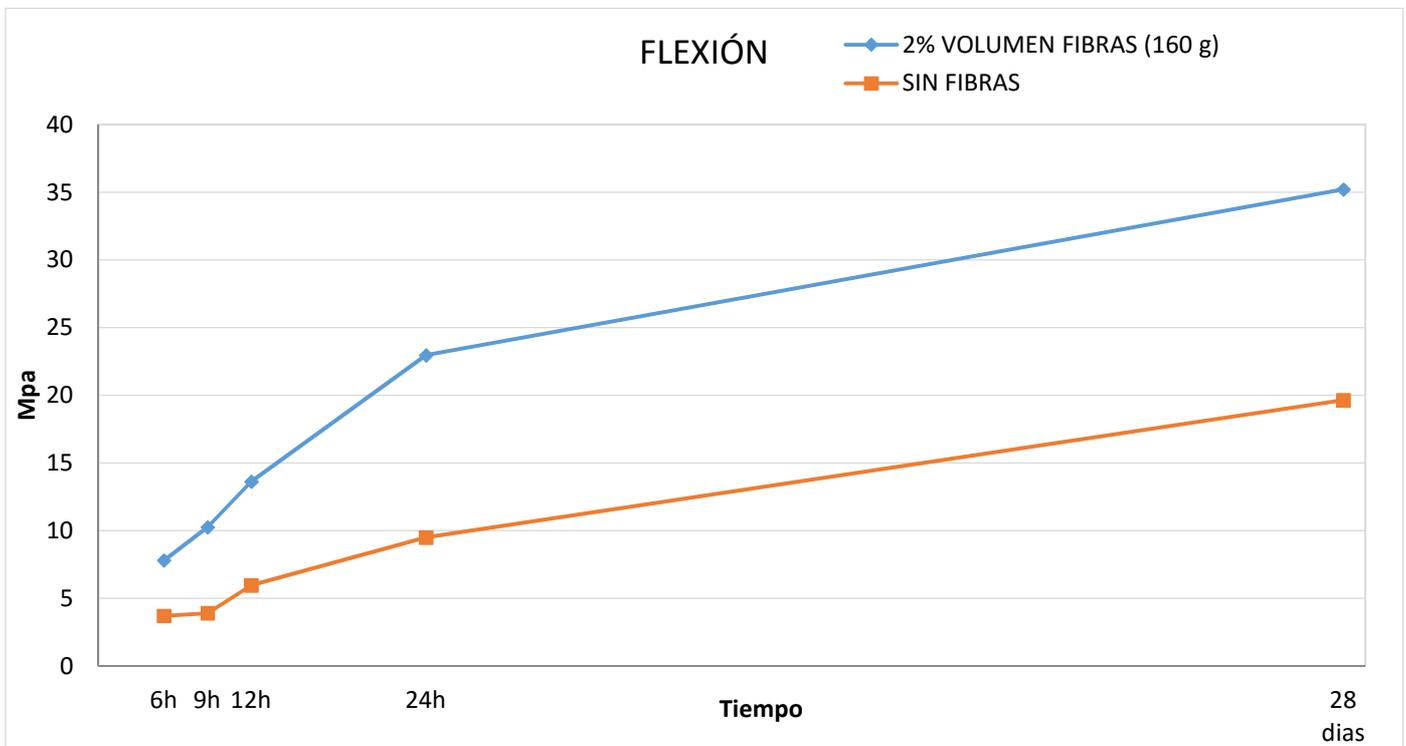
Para obtener las resistencias de los morteros que poseen 160 gramos de fibras, se realizan 5 morteros con la D2, con 3% de acelerador de fraguado y que han sido elaborados con un tiempo de fraguado de 20 segundos.

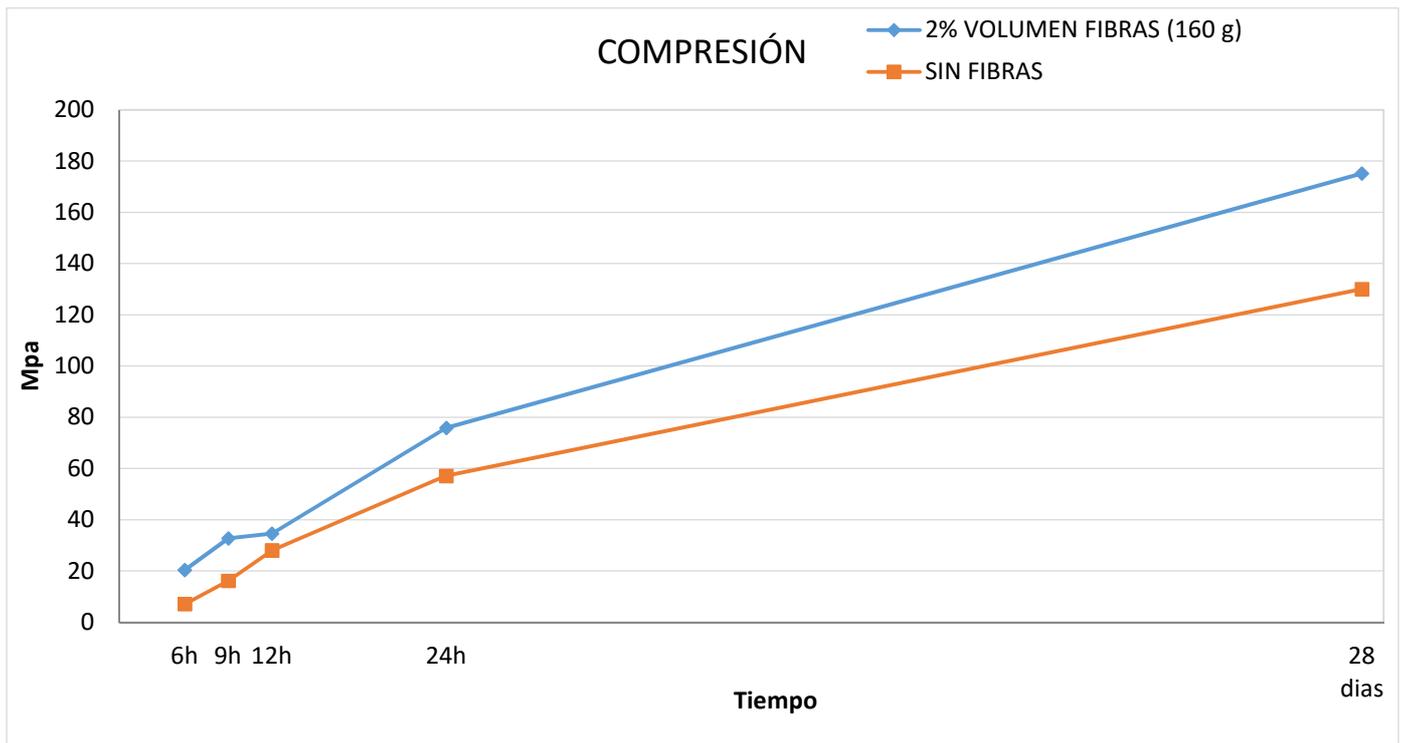
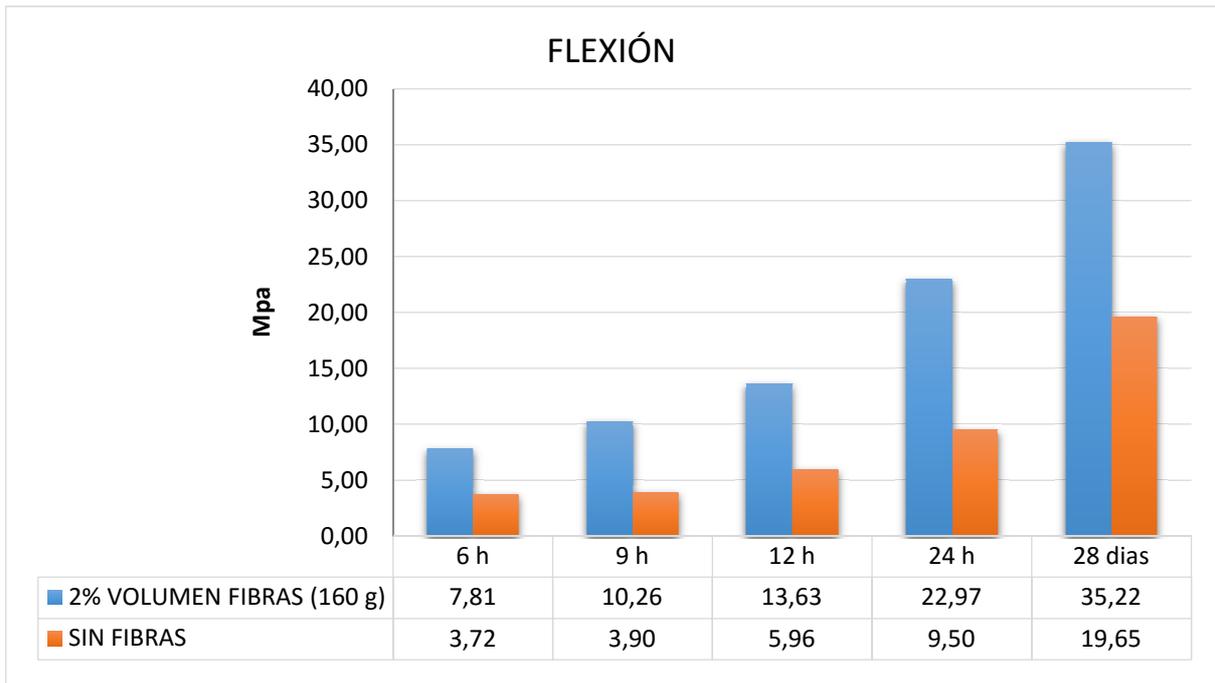
Estos morteros se comparan con 5 de las mezclas elaboradas en la fase anterior (A43-A47), que poseen idénticas características pero no poseen fibras.

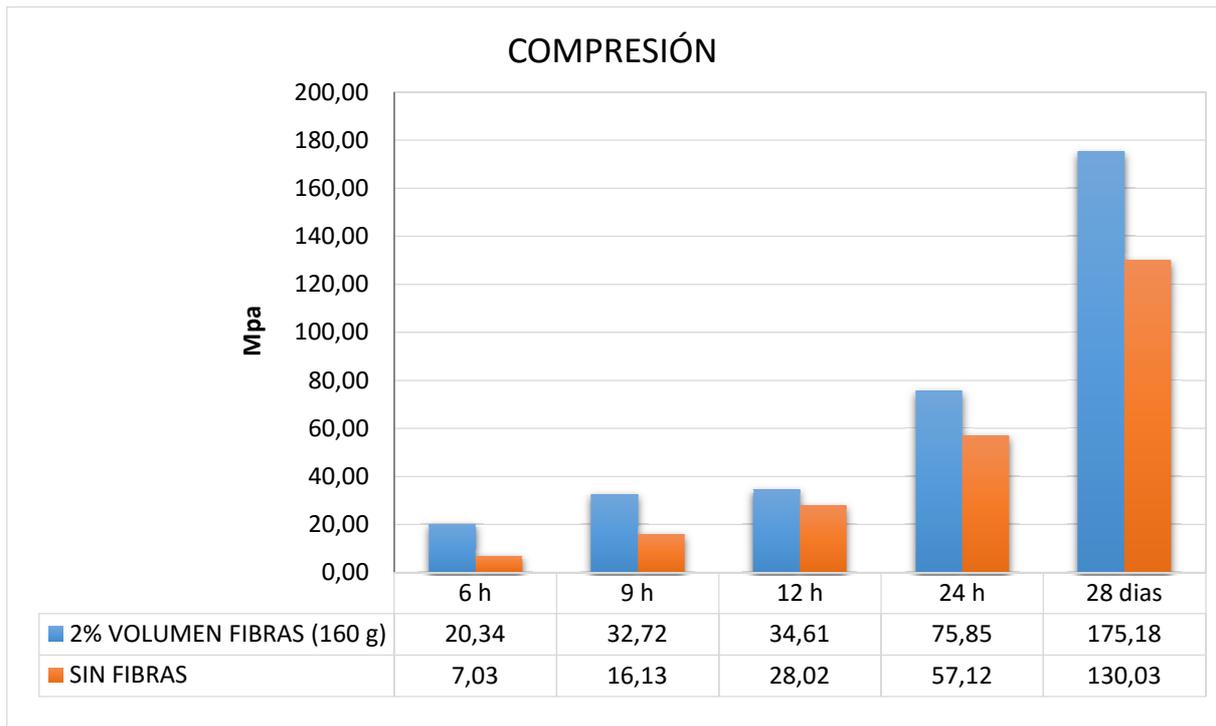
Por cada mortero se realizan 3 probetas, ensayándose un total de 15 probetas a flexión y 30 a compresión. Todas ellas se ensayan, como ya se ha comentado a 6, 9, 12 y 24 horas para evaluar las resistencias a tiempos cortos y a 28 días para evaluar las resistencias a tiempos largos. Los resultados obtenidos se observan en la tabla 11 y en los gráficos 29, 30, 31 y 32.

D2						
% ACEL. FRAGUADO	TIEMPO MEZCLADO	FIBRAS	MORTERO	ENSAYOS	RES.FLEXIÓN (Mpa)	RES.COMP (Mpa)
3 % (24 gr/l)	20 segundos	160 gr	F1	6 horas	7,81	20,34
			F2	9 horas	10,26	32,72
			F3	12 horas	13,63	34,61
			F4	24 horas	22,97	75,85
			F5	28 días	35,22	175,18
		0 gr	A43	6 horas	3,72	7,03
			A44	9 horas	3,90	16,13
			A45	12 horas	5,96	28,02
			A46	24 horas	9,50	57,12
			A47	28 días	19,65	130,03

Tabla 11: Resultados de las resistencias a flexión y compresión con y sin fibras. Fuente: Elaboración propia.







Gráficos 29, 30, 31 y 32: Evolución de las resistencias a flexión y compresión con y sin fibras. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los gráficos 29, 30, 31 y 32, las resistencias a flexión y compresión para todas las edades, aumentan al adicionar una cantidad controlada de fibras metálicas, concretamente un 2% del volumen total de la mezcla.

Por ello, la adición de fibras con estas características influye positivamente en las resistencias a corto y largo plazo, siempre que no se sobrepase la cantidad de fibras, pudiendo provocar dificultades en cuanto a la trabajabilidad de las mezclas.

Además la adición de fibras, podría asegurar la conexión o unión de las diferentes capas presentando la posibilidad de emplearse las mezclas desarrolladas para aplicaciones que puedan realizarse con las nuevas técnicas desarrolladas en los últimos tiempos.

5.CONCLUSIONES

En este proyecto se realiza un estudio concreto sobre varias mezclas, a partir de dos dosificaciones iniciadas anteriormente en diferentes estudios en la Universidad Politécnica de Valencia, concretamente en el ICITECH por el Departamento de Ingeniería de la Construcción [20] [52], con el objetivo principal de elaborar morteros de hormigón con características especiales que puedan ser proyectables, presentando elevadas resistencias a diferentes tiempos, aunque especialmente a tiempos cortos, con fraguado ultrarrápido y adecuada trabajabilidad con la posibilidad de incorporar fibras.

Se inicia la investigación sobre la evolución de la trabajabilidad y las resistencias de nuevas mezclas desarrolladas, con la finalidad de conseguir morteros de hormigón con fibras que puedan ser compatibles para emplearse con las nuevas tecnologías, garantizando resistencias iniciales y finales y con consistencia adecuada.

Todo esto, provocado por el creciente avance y desarrollo tecnológico actual en todas las industrias, incluida la constructiva y arquitectónica. El desarrollo de la proyección con hormigón, como ya se ha comentado, supuso un cambio en la ejecución de las obras civiles y de edificación, provocando ventajas en costos y tiempos.

Del mismo modo, en la actualidad, ya se está desarrollando, la impresión 3D con hormigón, la cual está suponiendo grandes ventajas, que pueden mejorarse llevando a cabo investigaciones con las mezclas imprimibles.

Por todo ello, como conclusiones al trabajo realizado, es importante destacar algunos aspectos conseguidos tras las diferentes fases de ensayo desarrolladas en el procedimiento experimental realizado:

-Se ha conseguido la elaboración de morteros con inicio de fraguado ultrarrápido, concretamente en un tiempo de 50 segundos desde el vertido del acelerador de fraguado en la mezcla, tras escoger en la fase 1, el acelerador de fraguado que más se adaptaba a los objetivos de los cuatro tipos distintos.

-Tras el minucioso estudio de diferentes tipos de aceleradores de fraguado, se escoge el que más se adecúa a las características definidas, en la cantidad exacta tras el estudio, por adelantar el inicio de fraguado y el endurecimiento sin provocar una gran disminución de las resistencias a largo plazo.

-La incorporación de fibras (metálicas y de pequeño tamaño) a las mezclas en cantidades controladas y adecuadas (aproximadamente del 2%), ha supuesto un incremento de las resistencias iniciales y finales, tanto a flexión como a compresión, en todos los tiempos y edades analizados.

-La modificación de algunas de las variables fijadas inicialmente, puede influir positiva o negativamente o no influir en los resultados estudiados. En este caso, la reducción de la variable "Tiempo de Mezclado del acelerador dentro de la amasadora", como variable modificada, no tiene influencia negativa en los resultados obtenidos, por disminuir de forma muy poco significativa las resistencias, y se considera una variable no influyente negativamente aunque su disminución suponga reducir los tiempos de fraguado de las mezclas.

6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto, corresponde a una fase inicial de investigación en la que se elaboran diferentes dosificaciones de morteros de hormigón para estudiar propiedades de dichas mezclas como son la trabajabilidad y las resistencias.

Además de todo esto, sería interesante continuar con el estudio e investigación de las mezclas obtenidas, las cuales presentan buenos resultados, para avanzar en el ámbito constructivo y arquitectónico adaptando este material a las nuevas tecnologías.

Por todo ello, esta investigación puede dar lugar a nuevas y variadas futuras líneas de investigación como pueden ser:

- Desarrollo y adaptación de una bancada de pruebas para proyectar los morteros de UHPFRC desarrollados en el este proyecto, con la maquinaria necesaria o combinando varias tecnologías.
- Estudio pormenorizado de todas las mezclas, valorando la posibilidad de sustitución de parte del cemento, con la adición de otras sustancias, para reducir la consecuente huella de carbono generada tras su producción, sin disminuir en gran medida las resistencias.
- Estudio de la conexión entre las capas de hormigón por el empleo de fibras, estudiando la influencia de las propiedades de éstas sobre las mezclas.
- Diseño, creación y utilización de un prototipo correspondiente que simule las condiciones equivalentes a una impresora 3D para incorporar las mezclas de hormigón previamente obtenidas.
- Realización de ensayos correspondientes, de resistencia, durabilidad, etc. en las piezas de hormigón obtenidas tras la extrusión o impresión a través del prototipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. R.A. Buswell et al. "Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction". Automation in Construction 16 (2007) 224–231.
2. R.A. Buswell et al. "Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction". Automation in Construction 17 (2008) 923–929.
3. S. Lim et al. "Developments in construction-scale additive manufacturing processes". Automation in Construction 21 (2012) 262–268.
4. M. Karakuset al. "An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM)". ROCKMEC'2004-VIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas, Türkiye.
5. A.J. Morañó Rodríguez et al. "El enfibrado de los materiales de construcción".
6. B. Khoshnevisk. "Houses of the Future Construction by Contour Crafting Building Houses for Everyone". UrbanPolicybrief, 2004
7. ACI, "ACI 506.2-95: Specification for Shotcrete". 1995
8. Austin, Simon. "Sprayed concrete technology". Chapman and Hall, 1996. ISBN 0419 222707.
9. AENOR. UNE-EN 14487-1:2008 "Hormigón proyectado. Definiciones, especificaciones y conformidad", 2008.
10. Yoggi, G.D. "History of shotcrete". American Concrete Institute (ACI), 2002.
11. Melbye, T et al. "Modern advances and applications of sprayed concrete". Shotcrete: Engineering Developments, 2001.
12. AENOR. UNE 83607:2014 IN "Hormigón proyectado. Recomendaciones de utilización", 2014.
13. EFNARC. "Execution of spraying". Revised version of section 8, 1999. ISBN 0952248379.
14. Patrick Power. "Predicting the service life of shotcrete: investigation on the transport properties of shotcrete mixes". Tesis doctoral, 2015.
15. P.I. Comino Almenara. "GRC: Material compuesto de matriz inorgánica reforzado con fibras de vidrio AR". Vetrotex España, S.A. 1996.
16. Recursos electrónicos:
<http://www.carbonconcrete.es/HTLM/es/Material%20Compuesto.html> (enero 2016)
17. Instrucción de hormigón estructural, EHE-08. "Anejos 14, 15, 16, 17 y 18". Ministerio de Fomento 2009. ISBN 978-84-498-0830-2.
18. Recursos electrónicos:
Iberia GRC: <http://www.iberiagrc.com/index.php/2-inicio/4-historia-del-grc> (enero 2016).
19. AFGC-SETRA, Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes, Interim Recommendations, France, January 2002.
20. E. Camacho Torregrosa (tesis), "Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties", Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
21. P. Serna et al, "UHPFRC: De los componentes a la estructura", I Simpósio Latino Americano sobre Concreto Autoadensável, Octubre 2012.
22. T. Ahlborn et al "An overview of UHPC Efforts through the North American Working Group", 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high performance construction Materials, Kassel Septiembre 2012.
23. J. Resplendino, "State of the art of design and construction of UHPFRC structures in France", 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high performance construction Materials, Kassel Septiembre 2012.

24. H.Coll (Tesis), *“Aspectos aprendidos sobre diseño estructural y detalles constructivos durante la ejecución de una pasarela peatonal de hormigón de muy alto rendimiento. Aprender de la experiencia”*, Universidad Politécnica de Valencia, Septiembre 2013.
25. Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición al amianto. REAL DECRETO 396/2006, BOE nº 86.
26. Recursos electrónicos:
<http://www.cancer.gov/espanol/cancer/causasprevencion/riesgo/sustancias/asbesto/hoja-informativa-asbesto> (febrero 2016).
27. Recursos electrónicos:
Tecnyconta:<http://www.tecnyconta.es/index.php?sec=23&id=94&idioma=> (febrero 2016).
28. Recursos electrónicos:
GRC Barcelona:<http://www.grc-barcelona.es/grc-tecnologia.html>(febrero 2016).
29. A. del Ágila. *“Paneles de fachada prefabricados de GRC”*, adaptación del capítulo 12 del libro *“Las tecnologías de industrialización de los edificios de vivienda”*, 1987.
30. GRCA INTERNATIONAL, *“GRCA Specification for the Manufacture, Curing and Testing of Glassfibre Reinforced Concrete (GRC) products”*, 2014.
31. Vetrovex Cem-Fil, *“Cem-Fil.Producción de GRC. Guía para la producción por Premix”*.
32. Vetrovex Cem-Fil, *“Cem-Fil.Producción de GRC. Guía para la producción por Proyección Simultánea”*.
33. Recursos electrónicos:
Preinco:<http://www.construnario.com/catalogo/preinco-sa/productos#>(febrero 2016).
34. Recursos electrónicos:
Andece: <http://www.andece.org/tipos-cerramientos/grc.html> (febrero 2016).
35. Laura Haymond (Thesis), *“Full Scale Contour Crafting applications”*, 2008.
36. J.Pegna, *“Exploratory investigation of solid freeform construction”*, Automation in Construction 5 (1997) 427-437.
37. J.Fontrodona Francolí et al, *“Estado actual y perspectivas de la impresión en 3D”*, D.L: B 27732-2014, 2014.
38. M. Porras Rodríguez (Tesis), *“Análisis técnico-económico de técnicas de fabricación aditiva para aplicación en diferentes sectores industriales”*, 2012.
39. M. Jiménez Calzado et al, *“La fabricación aditiva. La evidencia de una necesidad”*, Interempresas, 2013. Recursos electrónicos:
<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116342-La-fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html> (febrero 2016).
40. C. Contu (Tesis), *“3D-Shape y Contour Crafting. Las técnicas de automatización aplicadas a la construcción arquitectónica: El Rapid Building”*.
41. Recursos electrónicos:
Contour Crafting: <http://www.contourcrafting.org/> (febrero 2016).
42. Recursos electrónicos:
<http://www.totalkustom.com/home.html> (febrero 2016).
43. Valentina Colla et al, *“Impresión 3D a Gran Escala: Desde el fondo del mar a la luna”*.
44. P. Ramírez López-Para et al, *“Tecnologías aditivas, un concepto más amplio que el del prototipado rápido”*, XV Congreso Internacional de Ingeniería de proyectos, 2011.
45. ACI 116R-00, *“Cement and Concrete Terminology”*
46. M.Fernández Cánovas, *“Fraguado y endurecimiento de cemento Portland”*, Hormigón, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección Escuelas, 2007 (57-63), ISBN: 978 380 0364 0.
47. M.A. Gabalec (tesis), *“Tiempo de fraguado del hormigón”*, Tesis de Becarios de Investigación, Facultad Regional La Plata, Argentina, 2008.

48. J. Payá et al, *“Ciencia de los conglomerantes y adiciones”*, Máster en Ingeniería del Hormigón, Universidad Politécnica de Valencia, 2014.
49. A.M. Neville, *“Properties of Concrete”*, Fourth Edition (Longman), 1995.
50. F. Puertas et al, *“Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes”*, Instituto de Ciencia de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), 2001.
51. Recursos electrónicos:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf> (febrero 2016)
52. M.I. Fernández Benito (tesis), *“Desarrollo de productos de hormigón de muy alto rendimiento por conformado durante el proceso de fraguado”*, Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
53. Recursos electrónicos:
D-Shape: www.d-shape.com (febrero 2016).
54. AENOR. UNE-EN 196-1:2005 *“Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”*. Noviembre 2005.
55. AENOR. UNE-EN 196-3:2005+A1 *“Métodos de ensayo para cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad en volumen”*. Noviembre 2009.
56. AENOR. UNE-EN 480-2:2007 *“Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación del tiempo de fraguado”*. Marzo 2007.
57. AENOR. UNE-EN 12350-2:2009 *“Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de Asentamiento”*. Noviembre 2009.
58. AENOR. UNE-EN 12350-5:2009 *“Ensayos de hormigón fresco. Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas”*. Abril 2006.