

Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

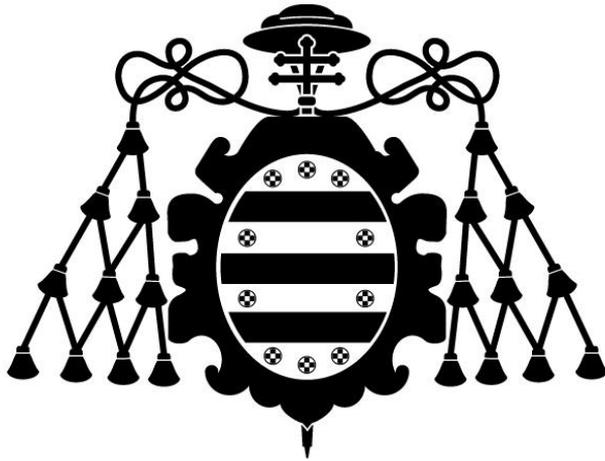
Programa de Doctorado de Materiales

INFLUENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS MINEROS
SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL
HORMIGÓN DE MUY ALTO RENDIMIENTO

TESIS DOCTORAL

Autor: Íñigo López Boadella

Abril 2019



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Programa de Doctorado en Materiales

INFLUENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS MINEROS
SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL
HORMIGÓN DE MUY ALTO RENDIMIENTO

TESIS DOCTORAL

Director: Fernando López Gayarre



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español: Influencia de la utilización de residuos mineros sobre las propiedades físicas y mecánicas del Hormigón de Muy Alto Rendimiento.	Inglés: Influence of utilization of mining waste on the physical and mechanical properties of Ultra High Performance Concrete.
2.- Autor	
Nombre: Iñigo López Boadella	DNI:
Programa de Doctorado: Materiales	
Órgano responsable: Comisión Académica Programa de Doctorado de Materiales	

RESUMEN (en español)

En el presente estudio se ha estudiado la influencia que tiene la utilización de residuos procedentes de una cantera de granito y residuos procedentes de los lavaderos de una mina de fluorita, como sustitutos parciales o totales del árido natural, sobre las propiedades de Hormigón de Muy Alto Rendimiento con Fibras de acero (HMARF). En primer lugar, para el desarrollo del programa experimental, se ha diseñado una dosificación de referencia que garantice un hormigón autocompactante, con una resistencia a compresión superior a 110 MPa. Una vez establecida la dosificación del hormigón de referencia se fabricaron y caracterización las diferentes amasadas de HMARF con residuos previstas en el programa experimental.

El estudio se ha realizado para analizar la posible influencia que pueda ejercer la procedencia, el tipo de residuo utilizado, el porcentaje de sustitución del árido natural y el tipo del árido a sustituir sobre las propiedades físicas y mecánicas del HMARF. Las propiedades evaluadas han sido: la consistencia, la densidad del HMARF endurecido, la absorción de agua, la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión, la resistencia a tracción y la retracción. Los porcentajes de sustitución han sido del 35%, el 50%, el 70% y el 100%.

Los resultados obtenidos indican que los residuos procedentes de la cantera de granito y de la mina de fluorita son una alternativa viable para la fabricación de un HMARF más sostenible utilizándolos como sustitutos de los áridos naturales.



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

RESUMEN (en Inglés)

In the present study the influence of the use of waste from a quarry of granite and waste from the washing of a fluorite mine, as partial or total replacement of natural aggregate, on the properties of Ultra High Performance Concrete with steel Fibers (HMARF) has been studied. First, to carry out the experimental program, a reference mixture has been designed that secures a self-compacting concrete with a compressive strength greater than 110 MPa. Once the dosing of the reference concrete was established, the different mixes of HMARF with waste predicted in the experimental program were manufactured and characterized.

The study was carried out to analyze the possible influence that the origin, the type of waste used, the percentage of substitution of the natural aggregate and the type of aggregate to be replaced may have on the physical and mechanical properties of the HMARF. The evaluated properties have been: the consistency, the density of the hardened HMARF, the water absorption, the compressive strength, the modulus of elasticity, the flexural strength, the tensile strength and the shrinkage. The substitution percentages have been 35%, 50%, 70% and 100%.

The results obtained indicate that waste from granite quarry and fluorite mine are a viable alternative for the manufacture of a more sustainable HMARF, using them as substitutes for natural aggregates.

**SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE
DOCTORADO EN MATERIALES**



RESUMEN

Durante las últimas décadas y debido a una sobreexplotación de los recursos naturales se están llevando a cabo diferentes políticas medioambientales con el fin de reducirla. Con ellas se pretende reducir el uso de los recursos no renovables y la reutilización de los residuos que se generan en las diferentes actividades económicas. Una de las actividades donde se genera un mayor volumen de residuos es el sector de la industria extractiva. Por esta razón, en España, en el año 2009, con el objetivo de reducir sus efectos adversos sobre el medio ambiente, entró en vigor el Real Decreto 975/2009 sobre gestión de residuos de las industrias extractivas

Con este trabajo se pretende contribuir a la gestión y reutilización de los residuos procedentes de la industria extractiva como material reutilizable o reciclado en el sector de la construcción. La presente tesis doctoral se ha centrado en analizar la influencia de estos residuos en la fabricación de Hormigones de Muy Alto Rendimiento con Fibras de acero (HMARF). Aunque el HMARF es un material de construcción prometedor, que se caracteriza por tener una gran resistencia a compresión y un excelente comportamiento frente a esfuerzos de flexotracción, desde el punto de vista ecológico podría tener bajos índices de sostenibilidad, ya que su fabricación conlleva un elevado consumo energético. Con la incorporación de residuos procedentes de la extracción del granito y la fluorita se persigue incrementar la sostenibilidad del HMARF.

En el presente estudio se ha estudiado la influencia que tiene la utilización de residuos procedentes de una cantera de granito de Pontevedra y residuos procedentes de los lavaderos de una mina de fluorita situada en Asturias, como sustitutos parciales o totales del árido natural, sobre las propiedades del HMARF. Para llevar a cabo el programa experimental, en primer lugar, se ha diseñado una dosificación de referencia que garantice un hormigón autocompactante con una resistencia a la compresión superior a 110 MPa. Una vez establecida se fabricaron y caracterizaron todas las amasadas previstas en el programa experimental, incorporando distintas cantidades de residuos.

El estudio se ha realizado para analizar la posible influencia que pueda ejercer la procedencia, el tipo de residuo utilizado, el porcentaje de sustitución del árido natural y el tipo del árido a sustituir sobre las propiedades físicas y mecánicas del HMARF. Las propiedades evaluadas han sido: la consistencia, la densidad del HMARF endurecido, la absorción de agua, la resistencia a compresión, el módulo de



elasticidad, la resistencia a flexión, la resistencia a tracción y la retracción. Los porcentajes de sustitución han sido del 35%, el 50%, el 70% y el 100%.

Los resultados obtenidos indican que los residuos procedentes de la cantera de granito y de la mina de fluorita son una alternativa viable para la fabricación de un HMARF más sostenible utilizándolos como sustitutos de los áridos naturales.



ABSTRACT

During the last decades and due to an overexploitation of natural resources, different environmental policies are being carried out in order to reduce it. These policies are intended to reduce the use of non-renewable resources and the reuse of waste generated in the different economic activities. One of the activities where a greater volume of waste is generated is the extractive industry. For this reason in Spain, in 2009, with the aim of reducing their adverse effects on the environment, Royal Decree 975/2009 about waste management of extractive industries came into force.

This work is intended to contribute to the management and reuse of waste from the extractive industry as reusable or recycled material in the construction sector. The present doctoral thesis has focused on analyzing the influence of these residues in the manufacture of Ultra High Performance Concrete with steel Fibers (HMARF). Although the HMARF is a promising construction material, which is characterized by have a high compressive strength and an excellent behavior against flexural stresses, from the ecological point of view it could have low sustainability indexes since its manufacture entails a high consumption energetic. With the incorporation of waste from the extraction of granite and fluorite, the purpose is to increase the sustainability of HMARF.

In the present study the influence of the use of waste from a quarry of granite from Pontevedra and waste from the washing of a fluorite mine located in Asturias, as partial or total replacement of natural aggregate, on the properties of HMARF has been studied. To carry out the experimental program, first of all, a reference dosage has been designed that secures a self-compacting concrete with a compressive strength greater than 110 MPa. Once established, all the mixed predicted in the experimental program incorporating different amounts of waste were manufactured and characterized.

The study was carried out to analyze the possible influence that the origin, the type of waste used, the percentage of substitution of the natural aggregate and the type of aggregate to be replaced may have on the physical and mechanical properties of the HMARF. The evaluated properties have been: the consistency, the density of the hardened HMARF, the water absorption, the compressive strength, the modulus of elasticity, the flexural strength, the tensile strength and the shrinkage. The substitution percentages have been 35%, 50%, 70% and 100%.

The results obtained indicate that waste from granite quarry and fluorite mine are a viable alternative for the manufacture of a more sustainable HMARF, using them as substitutes for natural aggregates.





ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	3
Índice	5
Listado de abreviaturas	11
Capítulo 1. Introducción y objetivos	13
1.1 Generalidades	13
1.2 Objetivos	16
Capítulo 2. Estado del arte	19
2.1 Introducción	19
2.1.1 Antecedentes.....	19
2.1.2 El HMAR en la actualidad.....	21
2.2 Materiales y dosificación del HMAR	23
2.2.1 Introducción.....	23
2.2.2 Cemento.....	24
2.2.3 Agua.....	25
2.2.4 Relación agua-conglomerante.....	25
2.2.5 Arenas naturales.....	26
2.2.6 Humo de sílice.....	27
2.2.7 Harina de sílice.....	27
2.2.8 Materiales cementicios suplementarios (MCS).....	28
2.2.8.1 Cenizas volantes (CV).....	29
2.2.8.2 Escoria de horno alto (EHA).....	30



2.2.8.3	Ceniza de cascara de arroz (CCA)	30
2.2.8.4	Ceniza de aceite de palma (CAP).....	32
2.2.8.5	Finos de piedra caliza (FPC).....	33
2.2.8.6	Vidrio en polvo (VP).....	33
2.2.9	Materiales de reemplazo del árido	34
2.2.10	Fibras de acero.	40
2.2.10.1	Influencia de la longitud, el tipo y la orientación de la fibra de acero sobre el HMAR.	43
2.2.10.2	Fibras de polipropileno.....	44
2.2.10.3	Fibras de vidrio.....	45
2.2.11	Aditivos.	45
2.2.12	Fabricación del HMAR.....	46
2.2.13	Proceso de curado del HMAR.....	48
2.2.13.1	Curado a temperatura ambiente (curado estándar).....	48
2.2.13.2	Curado térmico a presión atmosférica.	49
2.2.13.3	Curado en autoclave.....	49
2.3	Propiedades del HMAR con residuos.....	50
2.3.1	Resistencia a compresión.....	50
2.3.2	Resistencia a la flexión.....	52
2.3.3	Resistencia a la tracción.....	56
2.3.4	Módulo de elasticidad.....	57
2.3.5	Retracción.....	59
2.4	Durabilidad del HMAR con residuos.....	63
2.4.1	Permeabilidad, porosidad y absorción.....	63
2.4.2	Resistencia a la penetración de cloruros.....	64
2.4.3	Resistencia a la carbonatación.....	65



2.4.4	Resistencia a las heladas.....	65
2.4.5	Resistencia al fuego.....	66
2.5	Aplicaciones del HMAR.....	67
2.5.1	Aplicaciones reales del HMAR.....	68
2.6	Normativa existente sobre HMAR.....	77
2.6.1	Normativa sobre HMAR.....	77
2.6.2	Guías técnicas y recomendaciones.....	78
Capítulo 3. Estudio experimental. Materiales, criterios y procedimiento de ensayo		81
3.1	Introducción.....	81
3.2	Materiales.....	82
3.2.1	Cemento.....	82
3.2.2	Agua.....	83
3.2.3	Áridos naturales.....	83
3.2.3.1	Arena.....	83
3.2.3.2	Harina de sílice.....	83
3.2.4	Áridos reciclados.....	84
3.2.4.1	Residuos de mina de fluorita.....	84
3.2.4.2	Residuos de granito.....	87
3.2.5	Humo de sílice.....	89
3.2.6	Fibra de acero.....	90
3.2.7	Aditivos.....	91
3.3	Ensayos de caracterización de los materiales.....	92
3.3.1	Determinación de la distribución granulométrica.....	92
3.3.1.1	Distribución granulométrica de los áridos naturales y residuos.....	93
3.3.2	Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.....	94



3.3.3	Determinación de la densidad de partículas finas	98
3.3.4	Determinación de la densidad de partículas mediante pycnometría de helio.....	100
3.3.5	Determinación de los finos en la arena.....	101
3.3.6	Determinación de la composición química.....	105
3.4	Fabricación del HMARF.....	106
3.4.1	Dosificación del HMARF	107
3.4.2	Procedimiento seguido para la fabricación del HMARF reciclado.	109
3.4.3	Fabricación, curado y preparación de probetas.....	110
3.5	Ensayos de caracterización del HMARF fresco.....	112
3.5.1	Determinación de la consistencia del HMARF.....	112
3.6	Ensayos de caracterización del HMARF endurecido.	113
3.6.1	Determinación de la densidad.....	113
3.6.2	Determinación de la resistencia a compresión del HMARF.....	113
3.6.3	Determinación del módulo de elasticidad del HMARF.....	114
3.6.4	Determinación de la resistencia a flexión en cuatro puntos del HMARF.	117
3.6.4.1	Expresión de los resultados obtenidos del ensayo de flexotracción.	124
3.6.5	Determinación de la resistencia a tracción del HMARF.....	124
3.6.6	Determinación de la retracción del HMARF.....	127
3.6.7	Determinación de la absorción de agua del HMARF.....	128
Capítulo 4. Análisis de resultados		131
4.1	Introducción.....	131
4.2	Análisis de los resultados experimentales.	131
4.2.1	Análisis de los resultados obtenidos sobre la consistencia del HMARF fresco.	131
4.2.2	Análisis de la densidad del HMARF endurecido.....	139
4.2.3	Análisis de la absorción de agua del HMARF endurecido.....	146



4.2.4	Análisis de la resistencia compresión.....	152
4.2.5	Análisis de los resultados obtenidos sobre el módulo de elasticidad.....	159
4.2.5.1	Variación de los resultados obtenidos a partir del ensayo de módulo de elasticidad en compresión y del ensayo de resistencia a flexotracción.....	165
4.2.6	Análisis de los resultados obtenidos sobre la resistencia a flexión.....	169
4.2.7	Análisis del comportamiento a tracción.....	177
4.2.8	Análisis de los resultados obtenidos sobre la retracción.....	189
Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación		195
5.1	Conclusiones.....	195
5.1.1	Sobre las propiedades analizadas.....	196
5.1.2	Sobre los factores analizados.....	200
5.1.3	Consideraciones generales.....	201
5.2	Futuras líneas de investigación.....	201
Capítulo 6. Bibliografía y referencias.....		203
Anejo 1. Resultados de los ensayos.....		219
Introducción.....		219
Resultados de la caracterización de materiales.....		220
Distribución granulométrica.....		220
Densidad de partículas y la absorción de agua.....		231
Equivalente de arena.....		232
Resultados del ensayo de consistencia del HMARF fresco.....		232
Resultados del ensayo de densidad del HMARF endurecido.....		234
Resultados del ensayo de resistencia a compresión del HMARF.....		237
Resultados del ensayo de módulo de elasticidad del HMARF.....		242
Resultados del ensayo a flexotracción.....		245



Valores obtenidos de la resistencia a flexión del HMARF.....	265
Valores obtenidos de la resistencia a tracción del HMARF.....	269
Resultados del ensayo de Retracción del HMARF.....	272
Resultados del ensayo de absorción de agua del HMARF.....	279
Lista de tablas	287
Lista de figuras.....	291



LISTADO DE ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute.
AFGC	Association Française de Génie Civil.
AFNOR	Organización Nacional Francesa para la Estandarización.
AM	Arena residual de Mina.
AQSIQ	Administración de la Supervisión de Calidad, Inspección y Cuarentena (China).
CAP	Cenizas de Aceite de Palma.
CCA	Cenizas de Cáscara de Arroz.
CC	Cenizas de Carbón.
CR	Coral Reciclado.
CSA	Canadian Standards Association.
CSH	Silicato Cálcico Hidratado.
CV	Cenizas Volantes.
EHA	Escoria de Horno Alto.
EHE	Instrucción Española del Hormigón Estructural.
FG	Finos de Granito.
FGG	Finos de Granito con restos de Granalla.
fib	Fédération Internationale du Béton.
FM	Finos de Mina.
FPC	Finos de Piedra Caliza.
GG	Gruesos de Granito.
HAR	Hormigón de Alto Rendimiento.
HMAR	Hormigón de Muy Alto Rendimiento.
HMARF	Hormigón de Muy Alto Rendimiento con Fibras.
HMARR	Hormigón de Muy Alto Rendimiento Reciclado.
ITZ	Zona de Transición Interfacial.
LM	Finos de los Lavaderos de la Mina.
MCS	Materiales Cementicios Suplementarios.
RCD	Residuos de Construcción y Demolición.



RILEM	Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción.
RPC	Reactive Powder Concrete.
SAC	Administración de Estandarización (China).
SETRA	Servicio de Estudios Técnicos de Rutas y Autopistas de Francia.
SF	Humo de Sílice.
SIA	Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos.
SP	Aditivo Superplastificante.
VP	Vidrio en Polvo.
WFS	Residuos de Fundición.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 GENERALIDADES.

La explotación de los recursos naturales es una actividad que el ser humano lleva realizando desde el principio de los tiempos con el fin de mejorar su calidad de vida. Aunque la extracción intensiva de las materias primas se incrementó a partir de la Revolución Industrial, no ha sido hasta las últimas décadas cuando el ser humano se ha dado cuenta de la sobreexplotación intensiva de los recursos naturales, sobre todo de aquellos no renovables o de aquellos que son renovables parcialmente.

La utilización de grandes cantidades de recursos naturales es una actividad necesaria tanto para la mejora de la calidad de vida del ser humano como para su desarrollo tecnológico. Sin embargo, esto también ha traído consigo el agotamiento de algunas de sus fuentes, la destrucción del hábitat natural, la pérdida de biodiversidad a nivel mundial, la contaminación del medio ambiente y diferentes problemas medioambientales como son el aumento de gases de efecto invernadero y el agujero en la capa de ozono.

Debido a lo que se ha mencionado anteriormente, es obligatorio establecer diferentes políticas para realizar un correcto aprovechamiento de los recursos naturales y establecer una adecuada gestión y de los residuos generados. Para ello, en las últimas décadas la Unión Europea (UE) está llevando a cabo políticas de gestión de residuos para reducir su impacto sobre el medio ambiente, la salud de sus ciudadanos y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos. Siguiendo estas políticas medioambientales y continuando con los Programas de Acción en materia de Medio Ambiente de la Unión Europea, en el año 2014 entró en



vigor el **VII Programa de Medio Ambiente** [1] que guía la política ambiental europea hasta 2020 y tiene como objetivos principales: proteger, conservar y mejorar los recursos naturales de la UE; reducir la cantidad de residuos generados, maximizando su reciclado y reutilización; convertir a la UE en una economía eficiente en cuanto al uso de los recursos naturales; proteger a sus ciudadanos de actividades relacionadas con el medio ambiente que supongan un riesgo para su salud y bienestar; limitar el uso de vertederos donde se depositen los residuos que no son reciclables o no se puedan recuperar y garantizar la plena aplicación de los objetivos de la política de residuos en todos los Estados miembros de la UE.

Dentro de las diferentes actividades económicas que se realizan en los países de la UE, la industria extractiva es una de las actividades que generan una mayor cantidad de residuos, como se puede ver en la **figura 1**. Según Eurostat, la oficina de estadísticas de la UE, en 2014, la actividad extractiva fue la segunda actividad económica que generó mayor cantidad de residuos entre los 28 estados miembros, después del sector de la construcción [2]. Los residuos de la industria extractiva incluyen los diferentes tipos de residuos que se generan durante el proceso de extracción superficial o subterránea de los recursos minerales. Dentro de estos residuos también se incluyen los residuos que se generan durante el tratamiento del material extraído.

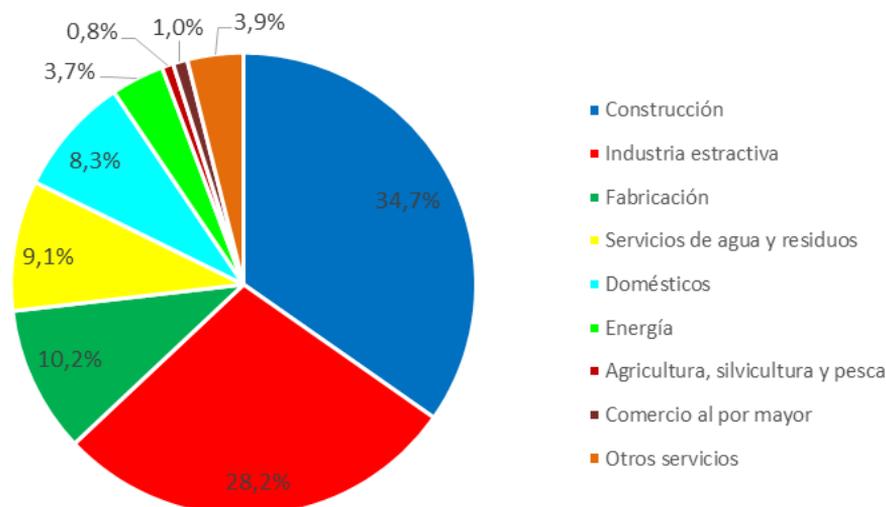


Figura 1. Generación de residuos por actividades económicas y hogares, EU-28, 2014 [3].

En España, según queda establecido en su normativa, los residuos de las industrias extractivas o residuos mineros son todos aquellos residuos sólidos, acuosos o en pasta que quedan tras la investigación y aprovechamiento de un recurso geológico, tales como son los estériles de mina, gangas de todo uno,



rechazos, las colas de proceso e incluso la tierra vegetal y cobertera en determinadas condiciones, siempre que constituyan residuos, tal y como se definen en la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados [4]. Como se puede ver en la **figura 2**, y según los datos publicados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) sobre la recogida y tratamiento de residuos, dentro del sector industrial, las industrias extractivas son, con gran diferencia, el sector que genera mayor cantidad de residuos [5].

Residuos generados por sectores industriales. Año 2014

Unidad: Miles de toneladas



Figura 2. Residuos generados por sectores industriales. Año 2014.

Como consecuencia de los datos que se han mencionado con anterioridad, en los últimos años se están estableciendo diferentes estrategias encaminadas a un mejor aprovechamiento de los recursos obtenidos en las industrias extractivas, una gestión adecuada de los residuos que se generan y, en el caso que sea posible, favorecer la reutilización y reciclado de los mismos. Por estas razones, en el año 2009 entró en vigor el Real Decreto 975/2009 [6] sobre gestión de residuos de las industrias extractivas con el objetivo de reducir sus efectos adversos sobre el medio ambiente.

Las aplicaciones de los residuos generados en las industrias extractivas están relacionadas con la actividad minera realizada y el tipo de residuo. Las industrias extractivas que mayor volumen de residuos generan son: la industria de las rocas ornamentales, la industria del carbón y la industria de la minería metálica. En el caso de los residuos obtenidos de la extracción y tratamiento de piedras ornamentales, se utilizan como materias primas en la construcción, como áridos para morteros y hormigones, como relleno



de terraplenes y como correctores y reguladores de la acidez en productos farmacéuticos o en la industria del caucho. En el caso de los residuos de la minería del carbón su uso principal está relacionado con la construcción de carreteras. Por último, en el caso de los residuos de la minería metálica, siempre y cuando estos no generen aguas ácidas, se pueden utilizar como áridos para carreteras, balasto para vías de ferrocarril y otros usos industriales [7].

Aunque, como se menciona en el párrafo anterior, los residuos procedentes de las industrias extractivas se emplean como materiales de construcción, a fecha de hoy no existen recomendaciones para la utilización de este tipo de residuos en la fabricación de hormigones, a diferencia de lo que ocurre con los Residuos de Construcción y Demoliciones para los cuales se han establecido una serie de recomendaciones recogidas en el anejo nº 15 de la EHE-08 [8]. Por esta razón, es necesario y recomendable llevar a cabo estudios experimentales que permitan garantizar el empleo de este tipo de residuos como materiales de construcción y que, además, sirvan como punto de partida para tratar de normalizar y establecer recomendaciones para su utilización en la fabricación de hormigón.

1.2 OBJETIVOS.

El desarrollo de la presente tesis doctoral persigue analizar el comportamiento de residuos procedentes de la industria minera como sustitutos totales o parciales de los áridos naturales en la fabricación de Hormigones de Muy Alto Rendimiento (HMAR). Los objetivos perseguidos en este trabajo son los siguientes:

- Estandarizar la fabricación de HMAR mediante el desarrollo de una dosificación básica utilizando las materias primas disponibles en Asturias.
- Estudiar la posibilidad de incorporar residuos y subproductos procedentes de la industria minera para incrementar la sostenibilidad en la fabricación del HMAR.
- Reutilizar, reciclar y valorizar grandes cantidades de subproductos industriales procedentes de la extracción de la fluorita y de las canteras de granito.
- Evaluar la calidad inicial, las posibilidades y, en su caso, los tratamientos necesarios de los residuos utilizados con el fin de definir de las propiedades exigibles para conseguir HMAR.



- Desarrollar diferentes dosificaciones utilizando los subproductos industriales anteriormente mencionados para obtener hormigones reciclados de muy alto rendimiento (HMARR).
- Efectuar propuestas para la dosificación de los HMARR con los residuos utilizados.
- Determinar las características físicas y mecánicas más relevantes de los HMARR obtenidos.
- Determinar la influencia de los residuos incorporados, según el tipo y el porcentaje, sobre las propiedades físicas y mecánicas más relevantes del HMARR fabricado.

Para llevar a cabo este estudio, el plan de trabajo seguido ha sido el siguiente:

1. Exhaustiva revisión del estado del arte actual de los HMAR fabricados con diferentes tipos de residuos industriales.
2. Selección, preparación y clasificación de los materiales y los residuos utilizados.
3. Caracterización física y mecánica de las materias primas y los residuos utilizados.
4. Diseño del programa experimental, amasadas de prueba y ajuste de dosificaciones del HMAR.
El diseño del programa experimental se ha realizado estableciendo una dosificación base, seleccionado los residuos utilizados y acordando los distintos porcentajes de sustitución de los áridos naturales. Dichas premisas garantizarán unos valores mínimos de autocompactabilidad y resistencia a compresión.
5. Fabricación y ensayo de las diferentes amasadas de HMAR.
6. Análisis de los resultados obtenidos. Este análisis se realizará teniendo en cuenta la influencia que pueden tener la procedencia y el tipo de residuo utilizado, el porcentaje de sustitución del árido natural y el tipo del árido a sustituir. Se analizará la influencia que dichos parámetros tienen sobre las propiedades del HMAR.





CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN.

Los hormigones de alto rendimiento, HAR o los hormigones de muy alto rendimiento, HMAR se caracterizan por tener una gran resistencia a compresión. Además, los HMAR mejoran las prestaciones frente a la flexotracción de las estructuras de hormigón incorporando diferentes tipos de fibra en su dosificación. La adicción de fibras también permite la reducción y el control de la fisuración. Se los denomina hormigones de muy alto rendimiento reforzado con fibras. Por otra parte, su durabilidad mejora notablemente respecto al hormigón convencional.

2.1.1 Antecedentes.

Como ocurre con otros materiales de construcción, los hormigones de alto rendimiento tienen diferentes denominaciones en función del país. Por ejemplo, en Alemania, a los HMAR se les denomina con el término "*Ultrahochfester Beton*" y son aquellos hormigones cuya resistencia a compresión está por encima de los 150 MPa. En los Estados Unidos, la FHWA, Federal Highway Administration, para poder definir a un hormigón como hormigón de alto rendimiento, además de una elevada resistencia a compresión, tiene que poseer una buena durabilidad. Además, su módulo de elasticidad ha de ser elevado y la deformaciones diferidas muy reducidas [9].

Como ya se menciona anteriormente, dentro de esta clase de hormigones se encuentran los hormigones de muy alto rendimiento (HMAR) y los hormigones de muy alto rendimiento reforzados con



fibra (HMARF). Tienen una resistencia a compresión a los 28 días superior a los 130 MPa, y pueden llegar a superar los 250 MPa. Su resistencia a flexotracción suele estar comprendida entre los 20 y 40 MPa [10, 11]. Su desarrollo comenzó a principio de los años 90 en Francia [12] donde P. Richard desarrollo un nuevo tipo de hormigón que ofrecía una resistencia a compresión superior a los 200 MPa, una resistencia a flexión por encima de los 40 MPa y, además, mostraba cierta ductilidad. En un primer momento se denominó "reactive-powder concrete" (RPC) ya que solo contenía materiales muy finos. En los años siguientes a la aparición del RPC, De Larrard [13] introdujo el término "ultra high performance concrete" (HMAR).

Sin embargo, no fue hasta el año 2002 cuando en Francia se publicaron las primeras recomendaciones para el uso de HMAR en estructuras [10]. En este primer documento se hace referencia a las propiedades mecánicas, el diseño estructural y la durabilidad de esta clase de hormigones. En el año 2009 se publicaron actualizaciones de estas recomendaciones. El mayor inconveniente de esta clase de hormigones es su correcta aplicación y su elevado coste.

En Canadá, a finales de la década de los 90, se utilizaron por primera vez los HMAR como material estructural [11], utilizándose en la construcción de una pasarela peatonal pretensada. Más tarde, en Francia, en el año 2001 se realizó el primer puente para vehículos con HMAR [14]. En la actualidad muchos países están utilizando el HMAR como material estructural, fundamentalmente en puentes y pasarelas. Por tanto, es obvio que los HMAR están recibiendo una atención a nivel mundial. En la **figura 3** y en la **figura 4**, se observan dos ejemplos del empleo de HMAR.



Figura 3. The Sherbrooke Pedestrian Bridge (Canadá) [11].



Figura 4. The Seonyu Pedestrian Bridge (Corea del Sur) [11].

En la Unión Europea cabe destacar el trabajo de investigación desarrollado en Alemania en el año 2005 y que fue financiado por la German Research Foundation [15]. El objetivo de este proyecto era adquirir los conocimientos básicos para poder desarrollar un HMAR que fuera fiable, económicamente factible y que pudiera ser aplicado con regularidad. Gracias a este proyecto de investigación se han construido numerosos puentes en Alemania usando HMAR.

A nivel de España, el artículo 31 de la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE) [16], define a los HAR como aquellos hormigones cuya resistencia característica es superior a los 50 MPa. Sin embargo, no hay ninguna regulación normativa sobre los HMAR. A este respecto F. Canovas considera hormigón de muy alta resistencia el que supera los 90 MPa y superhormigones los que superan los 125 MPa de resistencia a compresión a los 28 días [17]. En España, algunos ejemplos de elementos estructurales fabricados con HMAR son: la pasarela peatonal en la desembocadura del Barranco de las Ovejas en Alicante, la pasarela peatonal sobre la autopista V-21 en Puçol, Valencia y la pasarela peatonal para visitantes en la planta de tratamientos de residuos de Guadasuar también situada en la Comunidad Valenciana.

2.1.2 El HMAR en la actualidad.

Hoy en día, la sostenibilidad es un tema clave a nivel mundial, sobre todo en la construcción, ya que las industrias del cemento y hormigón son una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, en la Unión Europea, el 40% del consumo total de energía se atribuye al sector



de la construcción. En los países de Europa central alrededor del 70% del flujo de material total es causado por la industria de la construcción. Estas cifras muestran la importancia de la sostenibilidad en este sector. Por estas razones, en los últimos años, además de los esfuerzos que se han realizado para mejorar los materiales de construcción, la cuestión de la sostenibilidad ha ganado cada vez más atención y se ha convertido en un foco principal en la industria de la construcción y de sus materiales.

Por ello, con el objetivo de hacer frente a los problemas ambientales ocasionados en las diferentes etapas de los procesos constructivos, se está tendiendo a optar por:

- Desarrollar materiales de construcción con una alta durabilidad y resistencia, con el fin de extender su ciclo de vida.
- Desarrollar elementos de construcción con materiales con un menor consumo de energía, mediante la reutilización de subproductos industriales y/o materiales reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD).

Por otro lado, el rápido aumento en el consumo de áridos naturales, debido al aumento de la demanda por parte de la industria de la construcción en todo el mundo, está conduciendo a que las reservas totales se estén agotando rápidamente. Si no se toman medidas, este gran consumo de áridos naturales causará la destrucción del medio ambiente. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de encontrar y suministrar sustitutos alternativos para los áridos naturales explorando la posibilidad de la utilización materiales de desecho. Por ello, actualmente se están llevando a cabo estudios para el uso de materiales reciclados [18, 19] o subproductos de la construcción [20, 21] como remplazo total o parcial del árido natural en la búsqueda de un HMAR más sostenible.

Aunque el HMAR es un material de construcción prometedor, debido a que se consigue un aumento del ciclo de vida de los elementos estructurales con elevadas propiedades mecánicas, podría no ser un material sostenible desde el punto de vista ecológico ya que, generalmente, requiere altas cantidades de cemento lo que conlleva un elevado consumo energético. En consecuencia, actualmente se investiga el desarrollo de HMAR más ecológico, incorporando materiales con un menor consumo de energía mediante la reutilización de subproductos industriales [2, 18, 22, 23, 24]. Así, se consigue minimizar la explotación de los recursos no renovables y la reducción de RCDs. Como se estableció en el Informe Brundtland de 1987, donde se introdujo por primera vez el término “sostenibilidad” [25], el uso eficiente de las materias primas para la producción de materiales de construcción y la reutilización o reciclado de residuos de construcción es la única forma para poder garantizar la demanda futura de los recursos.



Actualmente, también se está estudiando el empleo de materiales cementicios suplementarios (MCS) para reemplazar parte del cemento y/o del humo de sílice [26, 27, 28, 29], y así conseguir un hormigón de muy alto rendimiento reciclado (HMARR) duradero y sostenible.

2.2 MATERIALES Y DOSIFICACIÓN DEL HMAR.

2.2.1 Introducción.

Los HMAR se componen de cemento, áridos, adiciones, agua, aditivos y, en ocasiones, incorporan fibras de otros materiales. En la **tabla 1** se muestra una dosificación tipo de HMAR. La diferencia entre los HMAR y los hormigones convencionales reside principalmente en la cantidad de cemento utilizada, en el tamaño máximo de árido y en la presencia de finos y fibras. El uso de una gran cantidad de aditivo superplastificante para obtener una buena trabajabilidad, también es otro distintivo del HMAR.

Comparado con el hormigón convencional, la matriz del HMAR es mucho más densa, ya que en este tipo de hormigones es importante lograr la máxima densidad de empaquetamiento posible [30] para obtener unas altas propiedades mecánicas y una alta durabilidad. La densificación de la matriz se logra optimizando el empaquetamiento de todas las materias primas granulares, es decir, del cemento, las adiciones y los áridos.

Material	kg/m ³	% en peso
Cemento Portland	712	28,5
Arena fina	1020	40,8
Humo de Sílice	231	9,3
Cuarzo molido	211	8,4
Superplastificante	30,7	1,2
Acelerador	30	1,2
Fibra de acero	156	6,2
Agua	109	4,4

Tabla 1. Ejemplo de dosificación de HMAR [31].

Otra característica singular de los HMAR es su elevada resistencia a compresión. Para poder conseguir que los HMAR tengan una alta resistencia a compresión, generalmente por encima de los 150 MPa, y una durabilidad muy notable, hay que tener en cuenta ciertas consideraciones en su diseño y dosificación [32]. Entre ellas podemos destacar las siguientes:



- Una relación agua-cemento muy baja, inferior a 0,25, aunque normalmente comprendida entre 0,16 y 0,20, que da como resultado una estructura muy densa y fuerte de los materiales y una minimización de los poros capilares.
- Una alta densidad de compactación, especialmente de las partículas finas en la matriz cementicia, que reduce la demanda de agua de la mezcla fresca y produce un aumento de la resistencia a compresión y una disminución de la fragilidad del hormigón.
- El uso de mayores cantidades de superplastificantes para ajustar la trabajabilidad del hormigón fresco.
- El uso de fibras cortas de acero u otras fibras para aumentar la resistencia a flexión y frente al esfuerzo cortante.
- Eliminación del árido grueso para mejorar la homogeneidad del hormigón.

Por consiguiente, una correcta selección de las materias primas y una óptima dosificación de la mezcla, son factores clave para poder conseguir el máximo rendimiento del HMAR. Sin embargo, esto hace que la producción de esta clase de hormigones resulte demasiado costosa para satisfacer la demanda de ingeniería a gran escala. Para reducir su coste se intenta sustituir parte de las materias primas más caras por residuos procedentes de otras actividades. En los siguientes apartados se analizan los diferentes materiales empleados en la fabricación de HMAR.

2.2.2 Cemento.

El cemento es un conglomerante hidráulico formado por materiales pulverulentos artificiales de naturaleza inorgánica que reaccionan con el agua dando lugar a un producto sólido y resistente. La pasta de cemento fragua y endurece tanto en el aire como bajo el agua. El cemento Portland está formado por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción hasta la sinterización, de una mezcla de caliza y arcilla que recibe el nombre de “clinker” y de un material empleado como regulador de fraguado que, generalmente, es yeso dihidrato [17].

En España, los distintos tipos de cemento están recogidos por la norma RC-16 [33], donde se establecen los criterios de conformidad, especificaciones y su composición.

A diferencia de los hormigones convencionales, los HMAR necesitan incorporar en su dosificación un alto contenido de cemento. A diferencia de los hormigones convencionales, en los que la cantidad de cemento está entre 250 y 500 kg/m³, el contenido de cemento en los HMAR suele estar entre 600 y 1000



kg/m³ en función del tipo de hormigón y la clase de exposición. A la hora de elegir el tipo de cemento es preferible un cemento con bajo contenido de C₃A (aluminato tricálcico) debido a su baja demanda de agua, ya que los HMAR se caracterizan por tener una relación agua/cemento muy baja.

El alto contenido de cemento afecta a los costes de producción del HMAR, incrementa el consumo de recursos naturales no renovables y tiene un efecto negativo sobre el medio ambiente debido a la emisión de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) durante su fabricación. Por estas razones, cierto porcentaje del cemento se suele reemplazar por otros materiales cementicios suplementarios (MCS). Algunos de los MCS más utilizados son:

- Cenizas volantes (CV).
- Escoria de horno alto (EHA).
- Cenizas de cascara de arroz (CCA).
- Cenizas de aceite de palma (CAP).
- Finos de piedra caliza (FPC).
- Vidrio en polvo (VP).

2.2.3 Agua.

El agua utilizada tanto para el amasado como para el curado del hormigón, tal y como se indica en el Artículo 27º de la EHE-08, no debe contener ninguna sustancia perjudicial en cantidades tales que afecten a sus propiedades [16]. Un buen índice para su empleo suele ser su potabilidad.

Aunque la EHE-08 permite el empleo de agua de mar en el proceso de amasado, su uso solo está permitido en hormigones que no lleven ningún tipo de armadura, teniendo en cuenta una reducción de la resistencia del hormigón de aproximadamente un 15%. Además, en estos casos se recomienda la utilización de un cemento resistente a los sulfatos o al agua de mar [16]. El agua empleada para el amasado también es adecuada para el curado del hormigón.

2.2.4 Relación agua-conglomerante.

La relación entre el agua y el conglomerante (w/c) es un parámetro fundamental para garantizar unas propiedades óptimas del hormigón. Una relación w/c por debajo de 0,25 garantiza un equilibrio entre la fluidez del hormigón y su resistencia en estado endurecido. Para los HMAR la relación w/c, normalmente, se suele encontrar entre el 0,16 y 0,20 [34], en lugar de 0,4-0,5 del hormigón convencional.



2.2.5 Arenas naturales.

Generalmente, las arenas suelen ser los materiales más económicos a la hora de fabricar los hormigones. En el caso de los HMAR las arenas utilizadas son arenas de cuarzo o de sílice, con el fin de lograr un mejor rendimiento debido a su alta resistencia.

Es importante que los áridos utilizados en el HMAR tengan un tamaño máximo que favorezca una alta densidad de empaquetamiento. Por eso, las fracciones más grandes del árido han sido tradicionalmente eliminadas y el tamaño medio de las partículas suele ser inferior a 1 mm, aunque también se han utilizado áridos de hasta 8 mm para producir HMAR. Sin embargo, en los últimos años se ha descubierto que si se añade cierto porcentaje de árido grueso al HMAR se consigue reducir la cantidad de cemento, la retracción del hormigón y, por tanto, su precio. Liu observa que el árido grueso puede introducirse con éxito en los HMAR para reducir aún más su coste sin afectar a la resistencia a la fisuración ni a la resistencia a tracción [35]. Por su parte, Jianxin Ma estudió el empleo de basalto triturado con un tamaño de partícula entre 2 y 5 mm para producir HMAR. El uso de los áridos gruesos condujo a una disminución en la fracción de volumen de la pasta cementícea, un HMAR más fácil de fluidificar y homogeneizar y un tiempo de mezcla más corto. Además, los HMAR exhibieron un comportamiento similar bajo esfuerzos de compresión y una menor retracción del HMAR que contenía áridos gruesos [36].

Las arenas de naturaleza silíceas son las más recomendables para la fabricación del HMAR. Con el fin de reducir el coste de los HMAR y, sobre todo, hacer más sostenible las actividades constructivas se persigue la reutilización de residuos. En esta línea se ha investigado la utilización de diferentes residuos como sustitutos de la arena. Algunos de estos residuos son: vidrio reciclado, arenas artificiales, residuos industriales y diferentes tipos de escoria [18, 19, 20, 21, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44] También, se han utilizado otras arenas naturales, en vez de las arenas silíceas, manteniendo su alto rendimiento mecánico y sin influir negativamente sobre la resistencia del HMAR [41]. Sin embargo, al tratarse de recursos no renovables, su utilización no contribuye a la conservación del medio ambiente. Por estas razones, en los últimos años se han llevado a cabo diferentes investigaciones sobre la sustitución de la arena por otra clase de materiales que contribuyen a reducir el coste de fabricación de los HMAR y la conservación del medio ambiente. Estos materiales se tratan con más detalle en el apartado 2.2.9.



2.2.6 Humo de sílice.

El humo de sílice (SF) o microsíllice es un subproducto pulverulento procedente de la fabricación en hornos eléctricos de silicio y ferrosilicio a partir de cuarzo, caliza y hierro. El polvo se recoge en filtros electrostáticos y está formado por partículas esféricas de una gran finura compuestas por alto porcentaje de SiO₂ amorfa (del 82 al 96%). La densidad relativa del SF es de 2200 kg/m³ y tiene un tamaño máximo de partícula inferior a una micra.

El SF, como adición en el HMAR, tiene dos funciones: por un lado actúa como plastificante debido a su finura y, por otro lado, tiene un papel químico al reaccionar con el hidróxido cálcico procedente del cemento generando silicatos cálcicos hidratados (CSH) que producen un aumento de las propiedades mecánicas, ya que se produce un descenso de la porosidad de la mezcla, en particular en la zona de transición interfacial (ITZ). Además, se consigue aumentar la densidad de empaquetamiento [34]. También se consigue un aumento de la adherencia de la pasta a los áridos, una disminución de la permeabilidad y un aumento de la cohesión de la mezcla. En consecuencia, el SF es un componente imprescindible para la fabricación de hormigones de alto rendimiento y hormigones de alta durabilidad.

Hay que destacar que el SF mejora la fluidez y la trabajabilidad del HMAR debido a su efecto lubricante, ya que libera parte del agua atrapada entre las partículas pequeñas. Sin embargo, Wu demostró que un exceso de porcentaje de SF produce una caída brusca de la fluidez del hormigón [45].

También mejora la resistencia a compresión y a la flexión de los HMAR debido a su efecto puzolánico [45, 46] y presenta una mayor resistencia a la penetración de los iones cloruro. Esto se cree que es debido al efecto de microrelleno y a su efecto puzolánico que densifica la estructura del poro, tanto de la pasta como de la ITZ del hormigón [46].

Por último, indicar que se trata de un recurso de disponibilidad limitada y con un alto coste, lo que reduce su aplicación en la industria de la construcción moderna, sobre todo en los países en desarrollo. Por estas razones, al igual que sucede con el cemento, se está buscando una alternativa para el mismo.

2.2.7 Harina de sílice.

La harina de sílice, también denominado polvo de cuarzo o polvo de sílice, es un material que, al igual que el humo de sílice, se caracteriza por un alto porcentaje de SiO₂, superior al 99%. La utilización de harina de sílice (SiO₂ cristalino) permite reducir el volumen de cemento y completar la curva



granulométrica en los tamaños más pequeños gracias a su finura. Su utilización en la fabricación de hormigones de altas prestaciones es debido a que contribuye al aumento de la densidad de empaquetamiento de la matriz, ya que sus partículas son lo suficientemente pequeñas como para llenar los huecos entre el cemento y las partículas de humo de sílice, con lo que se consigue una mayor compacidad, estabilidad y durabilidad de los hormigones. Como se mencionó anteriormente una matriz más densa tendrá un contenido más alto de CSH, lo que mejora tanto las propiedades mecánicas como la durabilidad de los hormigones.

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

Se han realizado ensayos para analizar la influencia entre la adición de harina de sílice y humo de sílice a la pasta del cemento. Las investigaciones mostraron que la actividad puzolánica de la harina de sílice es mucho mayor que la del humo de sílice lo que hace que la pasta de cemento sea más espesa y se acelere el proceso de hidratación del cemento [47]. Además, se consigue una mayor fuerza de unión entre la pasta de cemento y los áridos.

Sin embargo, al igual que sucede con el cemento y el humo de sílice, la harina de sílice tiene un elevado coste e incrementa la huella de CO₂. También puede producir problemas graves sobre la salud, como la silicosis, debido a su inhalación repetida. Por estas razones se han llevado a cabo diferentes estudios para su reemplazo por otros materiales [48].

2.2.8 Materiales cementicios suplementarios (MCS).

El alto contenido de cemento, así como el uso de humo de sílice y otros materiales en la producción del HMAR, hace que esta clase de hormigones tengan una influencia negativa sobre la huella de CO₂ y un mayor coste de producción en comparación con los hormigones tradicionales. Además, la presencia de sílice puede tener repercusiones negativas a largo plazo sobre la salud. Debido a estas causas y tratando de fomentar la sostenibilidad, se han comenzado a utilizar diferentes MCS en la fabricación de HMAR, como las cenizas volantes, las escorias de horno alto o las cenizas de cascara de arroz.



Con ello, además, se consigue minimizar la explotación de los recursos no renovables, la reducción de residuos acumulados en vertederos y, sobre todo, una correcta gestión de los residuos de construcción y demoliciones (RCDs). Además, tal y como se estableció en el Informe Brundtland, el uso eficiente de materias primas para la producción de materiales de construcción y la reutilización y el reciclaje de residuos de construcción son necesarios para mantenerse al día con la demanda futura [25].

2.2.8.1 Cenizas volantes (CV).

Las CV son un subproducto procedente de la combustión de carbón pulverizado en centrales termoeléctricas. Son arrastradas por los gases y recuperadas por precipitación electrostática o por captación mecánica. Las partículas que componen las CV son de forma esférica con un diámetro comprendido entre 1 y 500 micras y un contenido de SiO₂ que varía entre el 34% y el 62%. Las cenizas volantes pueden ser de diferentes tipos en función de su composición y procedencia [49, 50].

Se ha demostrado que el empleo de CV como sustituto del cemento o del humo de sílice produce una mejora de la fluidez del HMAR y por consiguiente de su trabajabilidad [23, 26, 51]. Además, se ha demostrado que el empleo de CV mejora algunas propiedades mecánicas del HMAR [26, 29, 52, 53, 54].

Varios estudios han demostrado que el empleo de CV en porcentajes de sustitución, inferiores al 40%, producen una mejora de la resistencia a flexión [52, 53]. Para un reemplazo del 20% del cemento por CV se consigue un aumento del 20% de la resistencia [52]. Por su lado, Zemei Wu, consiguió demostrar que con un reemplazo de hasta un 60% del cemento por CV se podía mejorar significativamente la resistencia a flexión del hormigón en condiciones de curado estándar y al vapor [26]. Además, el uso combinado de CV y EHA también puede mejorar considerablemente la resistencia a flexión del hormigón, independientemente del tipo de curado, y afecta positivamente al incremento de la fuerza de unión entre la matriz y las fibras de acero [53]. Sin embargo, hay que tener en cuenta una disminución del módulo de elasticidad, especialmente para reemplazos del cemento por encima del 30%.

Por último, el uso de CV, como sustituto del humo de sílice, puede ser una buena alternativa para reducir la retracción de los HMAR [52], ya que la adicción de las CV retrasan la fase de hidratación inicial del hormigón.



2.2.8.2 Escoria de horno alto (EHA).

Las EHA están constituidas por la ganga fundida (mineral sin valor que acompaña a los minerales metálicos) que flota sobre el arrabio en el crisol del horno alto. Estas escorias se consiguen gracias a que se vitrifican y granulan, a la salida del horno alto, al enfriarse bruscamente con duchas de agua o al aire, reteniendo en estado latente su energía de cristalización que desprenderán al hidratarse posteriormente. Para ser aptas, las EHA tienen que cumplir diferentes especificaciones de la norma UNE-EN 197 [55].

Diferentes investigadores han estudiado el empleo de las EHA como MCS en la producción de HMAR [22, 2, 26, 42, 54, 56]. En diferentes estudios se observa que la adicción de EHA no tiene influencia sobre la trabajabilidad del HMAR fresco, obteniendo una fluidez similar con adiciones de EHA de hasta el 45% [2, 54, 56]. Por otra parte, Kim consiguió mejorar considerablemente la trabajabilidad del HMAR para una sustitución del 30%, pasando de un diámetro de 160 mm a 205 mm en el ensayo de escurrimiento.

En cuanto a las propiedades mecánicas del HMAR, se ha visto que la adicción de EHA tiene diferentes efectos en función del esfuerzo al que es sometido el hormigón. En cuanto a la resistencia a flexión se ha visto, en diferentes estudios, que tiene un efecto muy positivo [26, 52, 53, 54]. Por otro lado, la influencia de adicción de porcentajes bajos de EHA no tiene efecto significativo sobre la resistencia a compresión. Sin embargo, la adicción de altos porcentajes de EHA, superiores al 40%, tiene un efecto negativo sobre la resistencia a compresión del HMAR, aunque los valores obtenidos en todos los casos son superiores al 75% de la resistencia del hormigón de control [2, 26, 54].

Por estas razones, el uso de las EHA como MCS tienen futuro en la fabricación de HMAR. A pesar de que su utilización provoca una leve pérdida de resistencia a compresión respecto al hormigón de control, los valores están por encima de los 140 MPa. Además, su uso reduce la cantidad de cemento y humo de sílice del HMAR y con ello el coste de la fabricación.

Ghafari investigó el efecto que tiene el empleo de EHA y CV sobre la retracción del HMAR, observando una reducción en la misma que estaba relacionada directamente con la reducción de la cantidad de poros presentes en los MCS [27].

2.2.8.3 Ceniza de cascara de arroz (CCA).

Las CCA se producen a partir de la quema controlada de la cascara de arroz a baja temperatura, un desecho agrícola ampliamente producido a nivel mundial. La cascara de arroz es la capa más externa



del grano del arroz que se separa durante el proceso de molienda y se utiliza como combustible en la industria de la molienda o como combustible para generar energía. Cuando la cáscara de arroz se quema en calderas se produce la ceniza de cáscara de arroz (CCA). Las CCA son aproximadamente el 25% en peso de la cáscara de arroz y se estima que se producen 70 millones de toneladas, cada año, en todo el mundo [57].

Aunque la composición química de la CCA varía de una muestra a otra debido a los diferentes tipos de arroz existentes, al año de la cosecha y a las condiciones climáticas, la cascara de arroz se caracteriza por tener un alto poder calorífico y un alto porcentaje de sílice amorfa. Este alto porcentaje de sílice (90-96%) hace que la CCA sea un prometedor MCS, siendo un recurso energético sostenible, renovable y de bajo coste. La utilización de CCA como material puzolánico en cementos y hormigones proporciona ciertas ventajas como:

- Reducción del calor de hidratación [58].
- Mejora de la resistencia [58, 59, 60, 61, 62].
- Permeabilidad reducida [58, 60].
- Aumento de la resistencia a los cloruros y sulfatos [58, 60].
- Reducción del coste de los materiales debido al ahorro de cemento [58].
- Beneficios ambientales relacionados con la eliminación de residuos y reducción de emisiones de CO₂ [58].

Aunque la adicción de CCA tiene un efecto negativo sobre la trabajabilidad del HMAR se ha demostrado que la combinación de CCA con otros materiales cementicios como SF [61] o con EHA [59] produce una mejora de su trabajabilidad.

Van informó que el empleo de CCA como adicción en el HMAR, en vez de SF, también tiene un efecto positivo sobre sus propiedades [61]. Esto es debido a que las partículas de CCA son capaces de absorber mayor cantidad de agua libre por lo que reduce la relación w/c de la matriz cementicia lo que provoca un incremento de la resistencia a compresión, sobre todo a edades tempranas. Además, como se muestra en la **figura 5**, gracias a la mayor absorción de agua, su pequeño tamaño de partícula y la alta reactividad puzolánica, la CCA es un material propicio para mitigar la retracción de los HMAR, que es uno de los mayores problemas de este tipo de hormigones [59]. Van Tuan estudió la influencia de las CCA sobre la retracción autógena del HMAR y sus resultados corroboran el efecto positivo que tiene la adicción de CCA para reducir la retracción del HMAR [63].

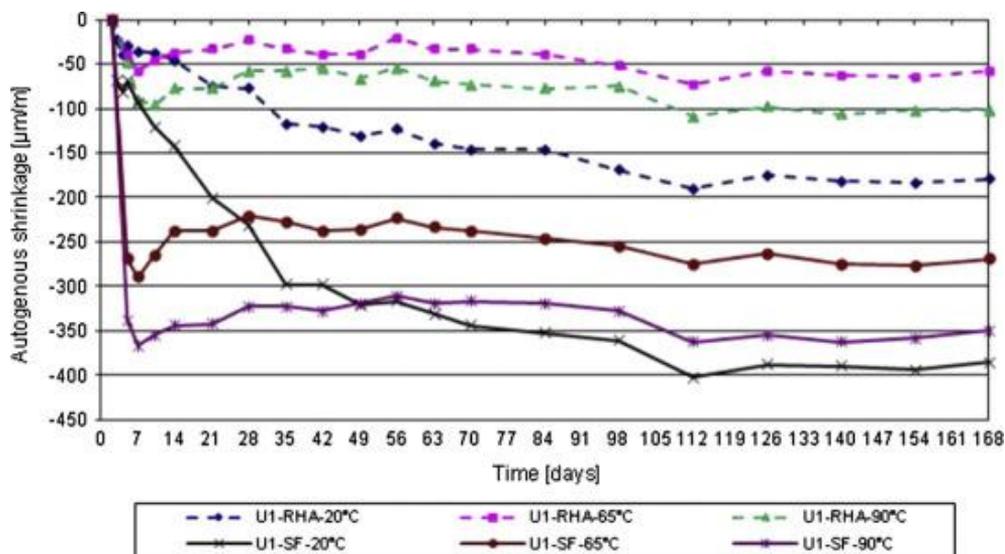


Figura 5. Retracción del HMAR con CCA bajo diferentes tratamientos [59].

2.2.8.4 Ceniza de aceite de palma (CAP).

La CAP es un subproducto obtenido al quemar fibras, conchas y racimos de frutas vacías como combustible en las calderas de molinos de aceite de palma. Se ha encontrado que las CAP tienen cualidades y propiedades puzolánicas por lo que puede tratarse de un buen material de construcción respetuoso con el medio ambiente [64]. Sin embargo, su utilización como MCS para la producción de HMAR es limitada y requiere mayor profundidad en su investigación.

En los pocos estudios realizados sobre la influencia de las CAP en las propiedades de los HMAR cabe destacar que mejoran la trabajabilidad del HMAR debido a su menor demanda de agua [65], incrementan la resistencia a compresión del HMAR con porcentajes de sustitución del cemento inferior al 25% [65] y mejoran el comportamiento frente a esfuerzos de flexión y tracción del HMAR [65]. Además, se ha demostrado que para una sustitución del 50% del cemento por CAP se incrementa la resistencia a flexión y tracción del HMAR en un 30% y un 15%, respectivamente [66]. Estas mejoras en la resistencia se pueden atribuir a la reacción puzolánica causada por el alto contenido de SiO_2 .

Por tanto, el empleo de CAP en la fabricación de HMAR minimiza la emisión de gases que favorecen el efecto invernadero y, además, pueden contribuir a la reducción de costes y a la sostenibilidad de la industria del hormigón.



2.2.8.5 Finos de piedra caliza (FPC).

El empleo de los finos de piedra caliza como sustitutos parciales del cemento producen un aumento de la trabajabilidad del HMAR permitiendo así reducir la cantidad de superplastificante y favorecer la hidratación más rápida del hormigón [48, 67].

En cuanto a las propiedades mecánicas del HMAR endurecido analizadas en diferentes estudios no se observa una pérdida significativa de resistencia a compresión o a flexión [67, 68]. En su estudio Burroughs observó una pérdida de resistencia inferior al 6% al sustituir el 100% de la harina de sílice por finos de piedra caliza. Esta reducción puede atribuirse a que los finos de piedra caliza tienen un tamaño de partícula ligeramente superior a la harina de sílice lo que reduce la densidad de empaquetamiento [48]. Por ello, la sustitución total de la harina de sílice por finos de piedra caliza parece ser una buena alternativa para eliminar la amenaza de la silicosis.

2.2.8.6 Vidrio en polvo (VP).

El vidrio, es un material que después de su uso se puede reciclar varias veces sin ver alteradas significativamente sus propiedades físicas y mecánicas. Sin embargo, grandes cantidades de vidrio no se pueden reciclar debido a que no cumplen los estrictos criterios de envasado, a su elevada fragilidad o a que su reciclaje tiene unos costes elevados. Esto origina que el vidrio se acumule en vertederos, siendo una solución poco deseada debido a que se trata de un material no biodegradable y, por tanto, contribuye a la contaminación del medio ambiente.

De acuerdo con la certificación LEED (Leadership in Energy and Environment Design), el uso del vidrio en vez de otros subproductos como el humo de sílice, las cenizas volantes o la escoria de horno alto, puede ser una buena alternativa para obtener un producto de mejor calidad. Esto es debido a que el VP se considera como un material post-consumo, mientras que los demás se consideran materiales de post-producción. Usar VP como MCS tiene muy poco impacto ambiental y por ello en los últimos años se ha intentado utilizar este vidrio residual para fabricar HMAR [69, 70, 71, 72]. No obstante, hay que tener en cuenta que el vidrio es un material con alto contenido de sílice lo que puede generar una reacción álcali-sílice que repercuta en la durabilidad del HMAR.

El VP tiene una distribución de tamaño de partículas comprendido entre el tamaño de las partículas del cemento y las del humo de sílice. Por tanto, al añadirlo como sustituto del humo de sílice se reduce la



demanda de agua y en consecuencia la cantidad de superplastificante para lubricar la mezcla con lo que, para una misma relación de w/c, mejora la trabajabilidad del HMAR fresco [69, 72]. Además, la escasa absorción de agua del VP y su superficie más lisa también contribuyen a dicha mejora.

Se ha estudiado detalladamente la influencia del VP sobre la resistencia a compresión [69, 70, 71, 72]. De estos estudios se puede deducir que el reemplazo óptimo de cemento o en su defecto humo de sílice por VP está entre el 20% y 30%, pudiendo llegar a sustituciones del 50% sin una pérdida excesiva de resistencia. Soliman encontró que el VP se puede usar como reemplazo total del harina de sílice, como se puede ver en la **figura 6** [69].

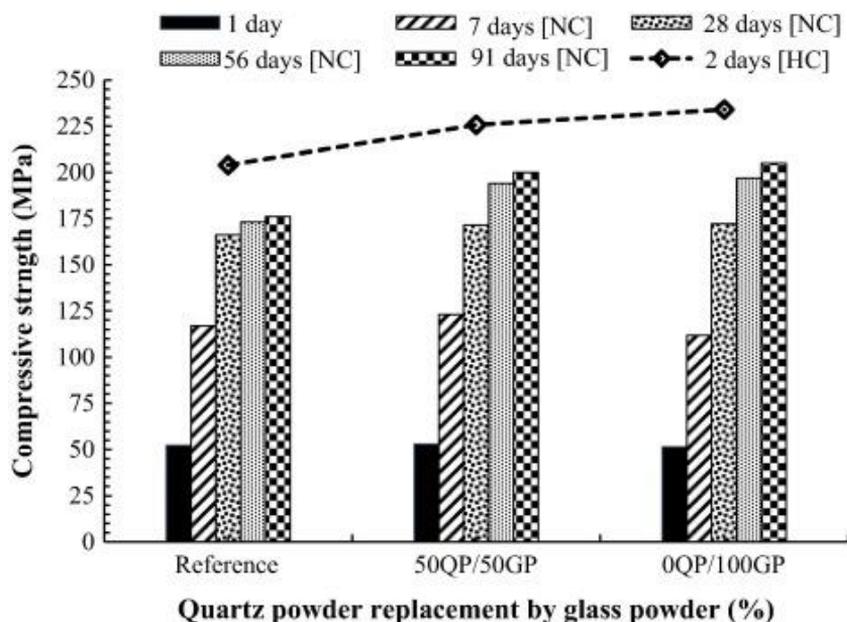


Figura 6. Efecto de la sustitución de harina de sílice por VP sobre la resistencia a compresión del HMAR [69].

2.2.9 Materiales de reemplazo del árido.

Tal y como se comentó anteriormente, con el fin de contribuir a conseguir un hormigón más sostenible, se están empleando diferentes materiales de reemplazo como sustitutos de las arenas naturales y arenas silíceas. El uso de residuos cerámicos finos como sustitutos de los áridos naturales aumenta la resistencia a compresión, la resistencia a flexión y la resistencia a tracción de los hormigones de alto rendimiento convencionales [19, 37], mientras que, la durabilidad del hormigón se ve afectada negativamente ya que se produce un aumento de la absorción del agua, un descenso de la resistencia a



la penetración de los cloruros, aunque el riesgo sigue siendo bajo, un aumento de la absorción del agua capilar, aunque los valores son próximos al HMAR de control, [37] y un peor comportamiento frente a las heladas [19].

Otros estudios investigaron el uso de diferentes residuos industriales como sustitutos de los áridos naturales. Zhao utilizó relaves de mineral de hierro, que son los residuos generados en la extracción o tratamiento del mineral y que son arrastrados por el agua de lavado, con varios niveles de sustitución, como se muestra en la **figura 7** [38]. Aunque su comportamiento mecánico disminuye a medida que aumenta el contenido de dichos residuos, cuando el contenido de ellos fue menor al 40%, las propiedades mecánicas del hormigón con relaves eran comparables a las del HMAR de control. Además, si el tamaño máximo de los residuos de hierro es inferior a 1,20 mm se puede llegar hasta una sustitución del 60% [21]. Esto es debido a que las partículas pequeñas pueden reducir la proporción del árido grueso y el volumen de la zona de transición entre el árido y la pasta. Por lo tanto, desde la perspectiva del comportamiento mecánico, es factible utilizar relaves de mineral de hierro para reemplazar parcialmente la arena natural en la fabricación de HMAR. Kim empleó escoria oxidante de arco eléctrico como sustituta del árido fino en los HMAR. Se observa que una sustitución total del árido fino por escoria oxidante de arco eléctrico es muy beneficioso para la fluidez y trabajabilidad del hormigón gracias a que tienen un efecto de deslizamiento debido a la superficie redondeada de sus partículas [42]. La pérdida de resistencia a compresión es inferior al 8%. Además, mejora considerablemente la fluidez y la trabajabilidad del hormigón.

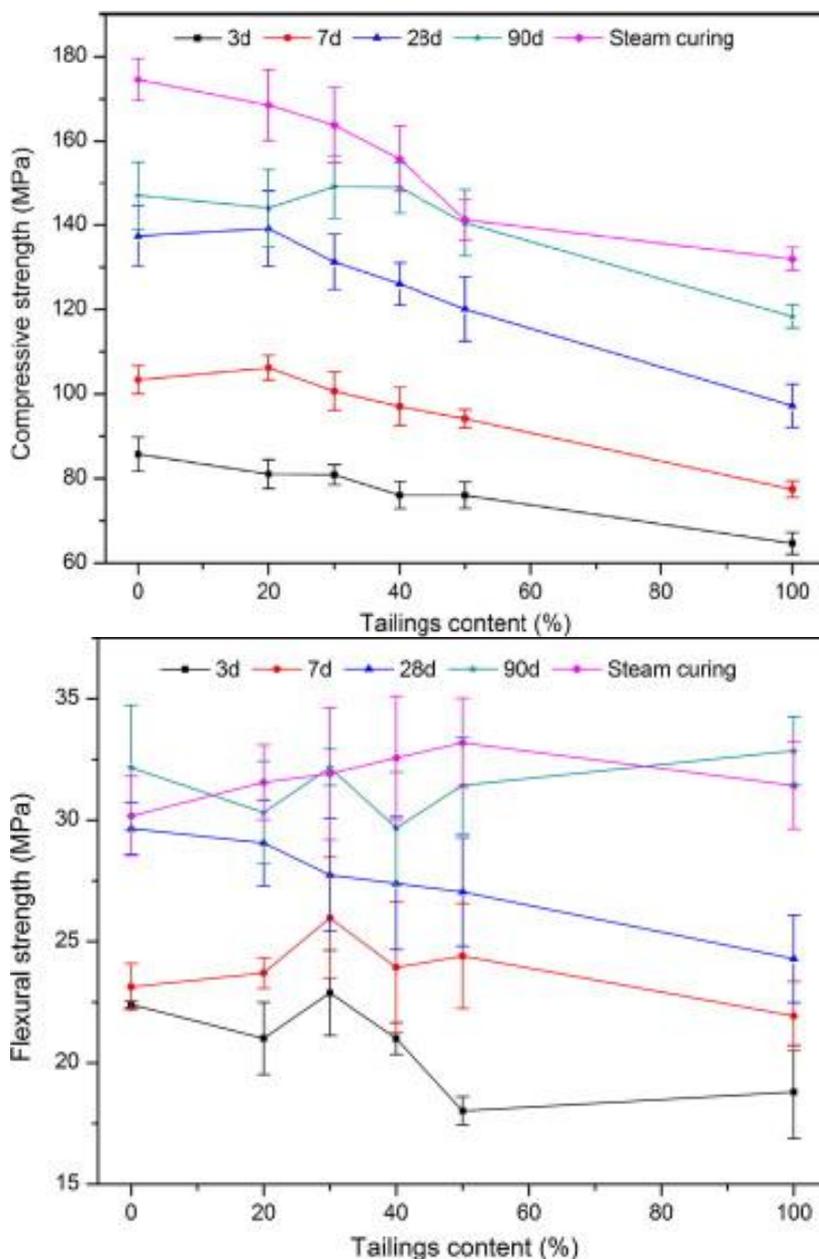


Figura 7. Resistencia a compresi3n (superior) y flexi3n (inferior) de HMAR con diferentes % de relaves de mineral de hierro [38].

La escoria de cobre es otro tipo de residuo industrial que se ha empleado como sustituto del 3rido natural. Se obtiene durante la fundici3n y refinado del cobre. Aunque en los 3ltimos a3os se ha estudiado



su empleo como sustituto del árido natural en la fabricación de hormigones [39], pocos son los estudios que se han realizado para su uso en la fabricación de HAR y HMAR [20, 40]. La sustitución íntegra de la arena por escoria de cobre para fabricar HMAR redujo la resistencia a compresión, aunque presenta valores superiores a los 150 MPa. La resistencia a la flexión y la energía a la fractura registradas fueron de un orden similar al hormigón de control [40]. De los resultados se puede concluir que el uso de escoria de cobre como árido fino en la fabricación de HMAR es técnicamente viable y muestra un futuro muy prometedor para la fabricación de HMAR. Al tratarse de un residuo que se genera industrialmente su disponibilidad y su bajo precio favorecen su desarrollo.

Los residuos de vidrio son otra clase de materiales que se pueden emplear como sustitutos de los áridos. Grandes cantidades de residuos de vidrio sin posibilidad de ser reciclados se vierten de forma rutinaria en los vertederos. Al no ser un producto biodegradable no es respetuoso con el medio ambiente y es completamente indeseable su vertido. Por eso en los últimos años, la atención se ha centrado en utilizar estos residuos como alternativa en la dosificación del hormigón. Los residuos de vidrio se han usado como áridos gruesos y finos en los hormigones convencionales [73, 74, 75]. Como sustitutos de la arena se observa una mejora de la trabajabilidad debido a la baja absorción, a una superficie lisa y un mayor contenido de aire en la mezcla. Yang y Soliman han demostrado que el uso de vidrio reciclado como sustituto total de la arena en los HMAR proporciona propiedades mecánicas prometedoras en comparación con el hormigón normal, aunque las propiedades mecánicas obtenidas no alcanzan los valores de los HMAR fabricados con las arenas naturales [18, 41]. Una posible explicación puede ser la menor densidad aparente lograda, la forma de las partículas o el alto contenido de aire presente en la mezcla. Sin embargo, una mezcla óptima de HMAR puede ser dosificada con una sustitución del 50% de la arena de cuarzo por arena de vidrio [18]. Esta mezcla puede proporcionar propiedades de fluidez y de resistencia a compresión aproximadamente similares al HMAR de referencia. El uso de residuos de vidrio en los hormigones puede contribuir a su fisuración producida por la reacción álcali-sílice. En el caso de los HMAR, la baja relación w/c, su alto contenido de humo de sílice y su baja permeabilidad hacen que no se genere la humedad suficiente para iniciar este tipo de reacción [18]. Por tanto, los residuos de vidrio se pueden utilizar de manera eficiente para producir HMAR y con ello eliminar la necesidad de utilizar arena de cuarzo o sílice, ofreciendo una solución económica y respetuosa con el medio ambiente.

Wang utiliza materiales a base de coral reciclado (CR) [43]. La adición de CR es efectiva para disminuir la retracción del HMAR. Esto es debido a que la estructura más porosa de la arena de coral



genera pequeños depósitos internos de agua que proporcionan la cantidad de agua de curado interno suficiente para contrarrestar la desecación del HMAR y, por tanto, la retracción que experimentan estos hormigones es menor que la de los HMAR convencionales. Mejora de manera efectiva la capacidad de resistencia frente a los cloruros del HMAR y, además, no se observa una reducción obvia en la resistencia a la compresión cuando se utiliza hasta un 30% de CR. Por tanto, los CR pueden usarse en la producción de HMAR para reemplazar de manera apropiada la arena y producir un HMAR con un impacto ambiental mucho menor en comparación con el HMAR normal.

Kou utiliza los residuos de cenizas volantes, que no son aptos como MCS, como sustituto de la arena [44]. La resistencia a compresión y a flexión aumenta progresivamente hasta obtener los valores más elevados para un porcentaje de sustitución del 50%. Este aumento de resistencia se atribuye a la mejora de la densidad de empaquetamiento de las cenizas volantes y su acción puzolánica. Además, si se realiza un curado del hormigón mediante vapor se puede incrementar considerablemente la resistencia del HMAR.

Sebaibi reemplazó la arena por compuestos termoestables reciclados de la ingeniería civil [76]. La sustitución fue menor del 10% pero se observa una ganancia de resistencia y ductilidad del hormigón.

Gesoglu estudia el empleo de arena natural contaminada con yeso para la fabricación de HMAR, en porcentajes de hasta el 12%. Esto es debido a que en Oriente Medio la presencia de niveles altos de sulfatos en las arenas naturales es bastante habitual [77, 78]. Se muestra un aumento de resistencia a compresión y a tracción y una disminución de la expansión longitudinal de los HMAR contaminados con sulfatos, sobre todo en aquellos que fueron sometidos a tratamientos térmicos.

Por último, basándose en los resultados de los diferentes estudios analizados, se puede concluir que la fabricación de HMAR con una sustitución parcial o total de las arenas, generalmente de naturaleza silíceas, por otras clases de materiales es factible. Con ello se consigue:

- Reducir la utilización de recursos naturales no renovables.
- Reducir las emisiones de CO₂.
- Reducir la acumulación de materiales en vertederos.
- Desarrollar un HMAR innovador, más económico y sostenible.

En las siguientes tablas se muestra un resumen de las propiedades mecánicas del HMAR que se han obtenido en diferentes estudios. En la **tabla 2** se muestran los resultados de resistencia a compresión,



en la **tabla 3** los resultados de resistencia a flexión y en la **tabla 4** los resultados de resistencia a tracción. En todos ellos se ha reemplazado la arena natural.

Autor	Residuo	% de Sustitución	Fibra	R. Compresión [MPa]
Wang [43]	Coral reciclado	20,00%	No	125
Zegardlo [19]	Residuos cerámicos	100,00%	No	129,6
Wang [43]	Coral reciclado	10,00%	No	130
Soliman [18]	Vidrio reciclado	100,00%	No	135
Ambily [40]	Escoria de cobre	100,00%	No	135
Liu [35]	Árido grueso	25,00%	2,50%	138,5
Sujing Zhao [38]	Relaves de hierro	20,00%	2,00%	139,6
Gesoglu [78]	Arena con yeso	7,61%	No	141
Soliman [18]	Vidrio reciclado	50,00%	No	147
Heeae Kim [42]	Escoria industrial	15,00%	1,00%	152
S.L. Yang [41]	Vidrio reciclado	100,00%	2,00%	155
Ambily [40]	Escoria de cobre	100,00%	2,00%	158
J. Ma [36]	Árido grueso	50,00%	No	165
Kou [44]	Desechas cenizas volantes	30,00%	2,00%	167,5
Zhu [21]	Relaves de hierro	100,00%	1,50%	183
Kou [44]	Desechas cenizas volantes	50,00%	2,00%	195
Zhu [21]	Relaves de hierro	60,00%	1,50%	199

Tabla 2. Resistencia a compresión a 28 días del HMAR con sustitución del árido natural.

Autor	Residuo	% de Sustitución	Fibra	R. Flexión [MPa]
Ambily [40]	Escoria de cobre	100,00%	No	12,3
Zegardlo [19]	Residuos cerámicos	100,00%	No	13,3
S. Al-Jabri [20]	Escoria de cobre	100,00%	No	14,5
Zhao [38]	Relaves de hierro	50,00%	No	17,0
Sebaibi [76]	Compuestos termoestables	35,00%	No	19,0
S.L. Yang [41]	Vidrio reciclado	100,00%	2,00%	21,0
Zhao [38]	Relaves de hierro	40,00%	2,00%	27,5
Kou [44]	Desechos de cenizas volantes	50,00%	2,00%	28,0
Ambily [40]	Escoria de cobre	100,00%	2,00%	32,5
Zhu [21]	Relaves de hierro	100,00%	1,50%	35,5

Tabla 3. Resistencia a flexión a 28 días del HMAR con sustitución del árido natural.



Autor	Residuo	% de Sustitución	Fibra	R. Tracción Indirecta [MPa]
Gonzalez-Corominas [37]	Residuos cerámicos	30,00%	No	5,25
S. Al-Jabri [20]	Escoria de cobre	70,00%	No	5,3
S. Al-Jabri [20]	Escoria de cobre	100,00%	No	5,6
Liu [35]	Árido grueso	25,00%	2,50%	8,28
Gesoglu [78]	Arena contaminada con yeso	7,61%	No	9,6

Tabla 4. Resistencia a tracción indirecta a 28 días del HMAR con sustitución del árido natural.

2.2.10 Fibras de acero.

Los HMAR son hormigones que se caracterizan, principalmente, por su alta resistencia a la compresión, impermeabilidad y resistencia a la abrasión superficial. Sin embargo, como muestran los resultados de diferentes estudios [79, 80, 81], esta clase de hormigones muestran un comportamiento de rotura frágil y explosiva con una caída brusca de la capacidad de carga, lo que limita el comportamiento elástico después de su fisuración. Este problema se resuelve mediante la adición de fibras de acero con lo que se consigue mejorar la ductilidad y la tenacidad a la fractura del HMAR. Esto se atribuye al hecho de que las fibras de acero pueden puentear las grietas y retrasar su propagación, lo que cambia el modo de fractura del hormigón de frágil a dúctil. Aunque la adición de las fibras de acero, en porcentajes bajos (2-3% del volumen total del hormigón), tiene un efecto beneficioso sobre todas las propiedades mecánicas del HMAR, su inclusión en la mezcla mejora notablemente el comportamiento del hormigón frente a esfuerzos de flexión y tracción. Como se observa en las siguientes tablas, la adición de fibra de acero al HMAR tiene un efecto positivo sobre sus propiedades mecánicas. Aunque se produce un aumento de la resistencia a compresión entre el 10% y el 20% (tabla 6), su efecto no es tan significativo como en los valores de la resistencia a flexión (tabla 5) y a tracción (tabla 7) ya que, en este caso, superan en más del doble a los obtenidos en los HMAR sin fibra de acero.

Resistencia a Flexión			
Autor	% de fibra	HMAR con fibra	HMAR
PetrMáca [81]	2,00%	29,7	13,9
Zemei Wu [82]	2,00%	27,8	19
Marko Orgass [79]	2,00%	14,1	12,2

Tabla 5. Influencia de la fibra de acero sobre la resistencia a flexión de los HMAR.



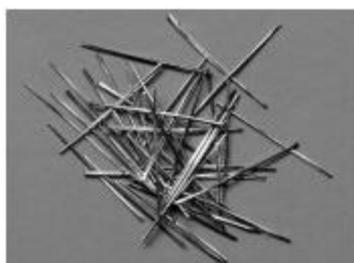
Resistencia a Compresión			
Autor	% de fibra	HMAR con fibra	HMAR
Yuliarti [83]	2,00%	178,0	166,4
PetrMáca [81]	2,00%	151,7	132,4
SafeerAbbas [80]	3,00%	164,0	151,0
Amr S.El-Dieb [84]	0,52%	124,0	95,0
A. Hassan [85]	2,00%	150,6	121,3
Zemei Wu [82]	2,00%	150,0	106,8
Marko Orgass [79]	2,00%	151,0	137,0

Tabla 6. Influencia de la fibra de acero sobre la resistencia a compresión de los HMAR.

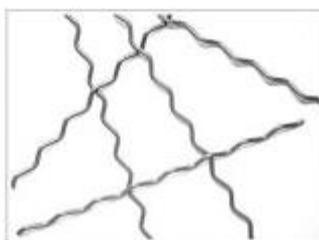
Resistencia a Tracción			
Autor	% de fibra	HMAR con fibra	HMAR
PetrMáca [81]	2,00%	10,3	6,6
SafeerAbbas [80]	3,00%	21,9	9,4
Amr S.El-Dieb [84]	0,54%	7,4	3,5
A. Hassan [85]	2,00%	9,07	5,36
Marko Orgass [79]	2,00%	11,5	9,1

Tabla 7. Influencia de la fibra de acero sobre la resistencia a tracción de los HMAR.

Los tipos de fibras cortas de acero que se añaden a la mezcla de HMAR son: fibras rectas, corrugadas o en forma de gancho, tal y como se puede ver en la **figura 8**.



Fibras de acero rectas



Fibras de acero corrugadas



Fibras de acero en gancho

Figura 8. Tipos de fibras de acero [86].

La adición de fibra de acero sobre los HMAR origina una pérdida de trabajabilidad del hormigón [84]. Las razones que originan esta pérdida de trabajabilidad pueden ser [68]:



1. La forma más alargada de las fibras de acero en comparación con los áridos y su mayor área superficial para el mismo volumen. Así se genera un aumento de las fuerzas de cohesión entre las fibras y la matriz.
2. La adición de fibras rígidas cambia la estructura del esqueleto granular.
3. Las fibras de acero a menudo se deforman para mejorar el anclaje entre la fibra y la matriz. La fricción entre las fibras con forma de gancho y los áridos es mayor en comparación con las fibras de acero rectas.

Como se ha demostrado en numerosos estudios [68, 80, 84, 82], la relación que existe entre el contenido de fibra y la trabajabilidad del HMAR es inversamente proporcional. Una forma de compensar esta pérdida de trabajabilidad es incrementando la cantidad de superplastificante. En la **figura 9** se observa que, además del porcentaje de fibra la forma de las fibras también influye en la trabajabilidad del HMAR, reduciéndose más en los hormigones que incorporan fibras de acero con forma de gancho. Esto se debe a que las fibras con forma de gancho aumentan la fricción con el árido debido a que son propensas a agruparse entre sí [82].

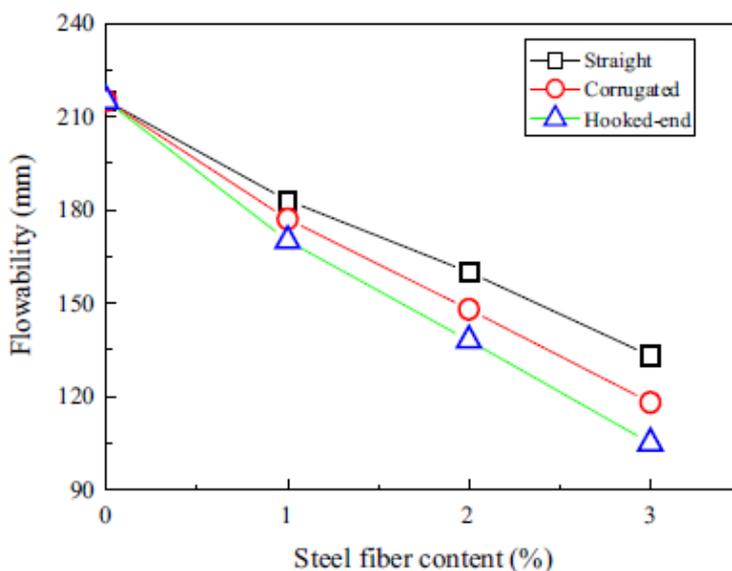


Figura 9. Efecto de la forma y el porcentaje de fibra de acero sobre la fluidez del HMAR [82].

El empleo de un tipo u otro de fibras repercute de diferente manera sobre las propiedades del HMAR.



Los hormigones con fibras con forma de gancho son capaces de soportar mayores esfuerzos. Se observa una mejora considerable de la resistencia del hormigón frente a esfuerzos de flexión y tracción. Y aunque la resistencia a compresión, la capacidad de deformación y el módulo elástico también se incrementan al incluir fibras de acero con forma de gancho, en comparación con el uso de fibras de acero rectas, la mejora es insignificante en relación a la obtenida en flexión y tracción. Esto es debido a un mejor enclavamiento mecánico de las fibras con forma de gancho respecto a las rectas y a las corrugadas [35, 58, 82]. El tipo de fibra tiene poco efecto sobre la resistencia a la primera fisura, pero tiene un efecto considerable sobre la carga máxima soportada por el HMAR.

2.2.10.1 Influencia de la longitud, el tipo y la orientación de la fibra de acero sobre el HMAR.

Diferentes estudios han demostrado que la longitud de las fibras de acero influye de manera diferente sobre las propiedades mecánicas del HMAR [58, 80, 87, 88]. La resistencia a compresión y la durabilidad del HMAR no suele verse afectada por la longitud de las fibras [58, 80, 87], aunque a dosis más altas de fibras se observa una mejora de la durabilidad debido a que se consigue un HMAR más denso y con una porosidad más baja [80]. Sin embargo, la resistencia a la flexión y a la tracción se ven influenciadas por el tamaño de la fibra de acero empleada a la hora de fabricar el hormigón. El empleo de fibras de acero con una longitud superior a los 10 mm suele dar un mejor comportamiento frente a esfuerzos de tracción y flexión y una mayor capacidad de carga frente a la energía de fractura [58, 87, 88]. Esto se debe principalmente al hecho de que el uso de este tipo de fibras aumenta el área de unión entre la fibra y la matriz, lo que conduce a una mayor capacidad de carga, siempre que la longitud de la fibra no sea excesiva, ya que una fibra demasiado larga produciría una mala distribución provocando una disminución de la carga máxima soportada por el HMAR.

La orientación de las fibras dentro de la matriz se ve afectada por una serie de parámetros como su geometría, la interacción entre la fibra y el árido, la fluidez del hormigón, las formas de vertido y la geometría del encofrado. La distribución y orientación de las fibras dentro del hormigón fresco es el factor que más influye sobre su ductilidad. Por tanto, para obtener hormigones con propiedades óptimas se requiere una orientación adecuada y una buena distribución [89]. A lo largo de los años los investigadores se han dado cuenta que la orientación de las fibras de acero en el hormigón afecta significativamente a su rendimiento mecánico y estructural. A este respecto se han realizado estudios para poder evaluar



cuantitativamente cómo se ven afectadas las propiedades mecánicas de los HMAR por la orientación de las fibras [87, 88, 90, 91, 92].

Barnett estudió la influencia que tiene la distribución y orientación de las fibras de acero sobre paneles de HMAR sometidos a esfuerzos de flexión. Tienden a alinearse perpendicularmente al flujo de hormigón presentando un efecto significativo sobre la resistencia a flexión de los paneles. Los mejores resultados se obtuvieron en los paneles en los que se vertió el hormigón desde el centro de ellos [91]. Por otra parte, cuando la orientación de las fibras coincide con la dirección de la carga aplicada se observa un incremento de las propiedades [88]. Este mejor rendimiento se produce sobre todo frente a esfuerzos de flexión y tracción. Sung Wook Kim, demostró que el esfuerzo máximo de flexión soportado por el HMAR mostraba diferencias de hasta el 50% en función de si la dirección de las fibras era paralela o perpendicular al esfuerzo [90].

Por otro lado, Kang investigó como influía la orientación de las fibras de acero sobre el comportamiento a tracción de los HMAR antes y después de su fisuración [92]. Observó que las probetas con las fibras en dirección paralela al esfuerzo tenían un mejor rendimiento frente a esfuerzos de tracción (> 40%). En cuanto a la resistencia a la primera fisura no se ve muy influenciado por la orientación.

2.2.10.2 Fibras de polipropileno.

Al contrario que en las fibras de acero, el módulo de elasticidad de las fibras de polipropileno es bajo. Por este motivo el aumento en la resistencia a flexión del hormigón con este tipo de fibras no es tan significativa como para los hormigones con fibras de acero. Además, las deformaciones una vez fisurado también son más elevadas. No obstante, con un 0,6 % de fibras en volumen, se puede incrementar la resistencia a flexión un 25%. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la resistencia a compresión disminuye cuanto mayor es la dosificación de fibras y la longitud de las mismas [93]. Con la utilización de fibras de polipropileno también se incrementa mucho la resistencia del hormigón frente impactos [94].

Las fibras de polipropileno se mezclan sin problema en hormigoneras tradicionales. No existe problema de formación de erizos o bolas cuando se utilizan grandes dosificaciones. A su vez, este tipo de fibras se presta muy bien a su empleo en hormigones bombeados y poseen la ventaja de no ser atacadas por los álcalis y de no corroerse. Sus inconvenientes principales radican en su bajo módulo de elasticidad, que las hace muy deformables, y en la pobre adherencia con el hormigón [93].



2.2.10.3 Fibras de vidrio.

Las fibras de vidrio destacan por su alta resistencia a tracción y su aceptable módulo de elasticidad pero tienen el inconveniente de ser atacadas por los álcalis de los cementos portland. Estas fibras no se emplean en forma de filamentos sueltos sino formando conjuntos de filamentos o cordones. Para lograr una buena dispersión de las fibras en el amasado suele usarse un aditivo a base de óxido de polietileno mezclado con el agua. El porcentaje de fibras a emplear varía entre el 2 y el 5% en peso de los materiales secos [93]. La resistencia a compresión decrece dependiendo del porcentaje de fibras utilizado [95].

2.2.11 Aditivos.

En el caso de los HAR y HMAR es preciso conseguir una alta trabajabilidad de la mezcla y la única forma es mediante el empleo de aditivos superplastificantes (SP). Los SP pueden reducir significativamente la relación w/c sin que la trabajabilidad varíe. Esto produce una reducción de la porosidad y un aumento de la resistencia del hormigón [96]. Con el uso de SP se pueden lograr reducciones del agua comprendidas entre el 20% y el 40% sin una pérdida excesiva de trabajabilidad. Además, se ha comprobado que la eficacia de este tipo de aditivos se incrementa cuanto mayor es la dosificación de cemento [17].

Dentro de los SP cabe destacar los superplastificantes de alto rendimiento basados en éter de policarboxilato, denominados también policarboxilatos (PC). Permiten una dispersión efectiva de las partículas de cemento para su mejor hidratación [97]. Con una dosificación relativamente baja de este tipo de aditivos, entre el 0,15-0,30 % del peso del cemento, se puede llegar a una reducción del agua de hasta el 40%. Con esta clase de aditivos también se puede controlar el tiempo de fraguado y mejorar la resistencia inicial y/o final [98].

A nivel global se han realizado diferentes estudios [98, 99, 100] donde se analizó la influencia que tienen sobre las propiedades mecánicas del HMAR, el tipo de SP empleado y el procedimiento de inclusión en la mezcla del hormigón fresco. Se observa un mejor rendimiento del SP y un aumento de la fluidez cuando se agrega poco a poco y no de una sola vez. Además, como se observa en la **figura 10**, no se observa una influencia significativa del tipo de SP en la resistencia final del HMAR.

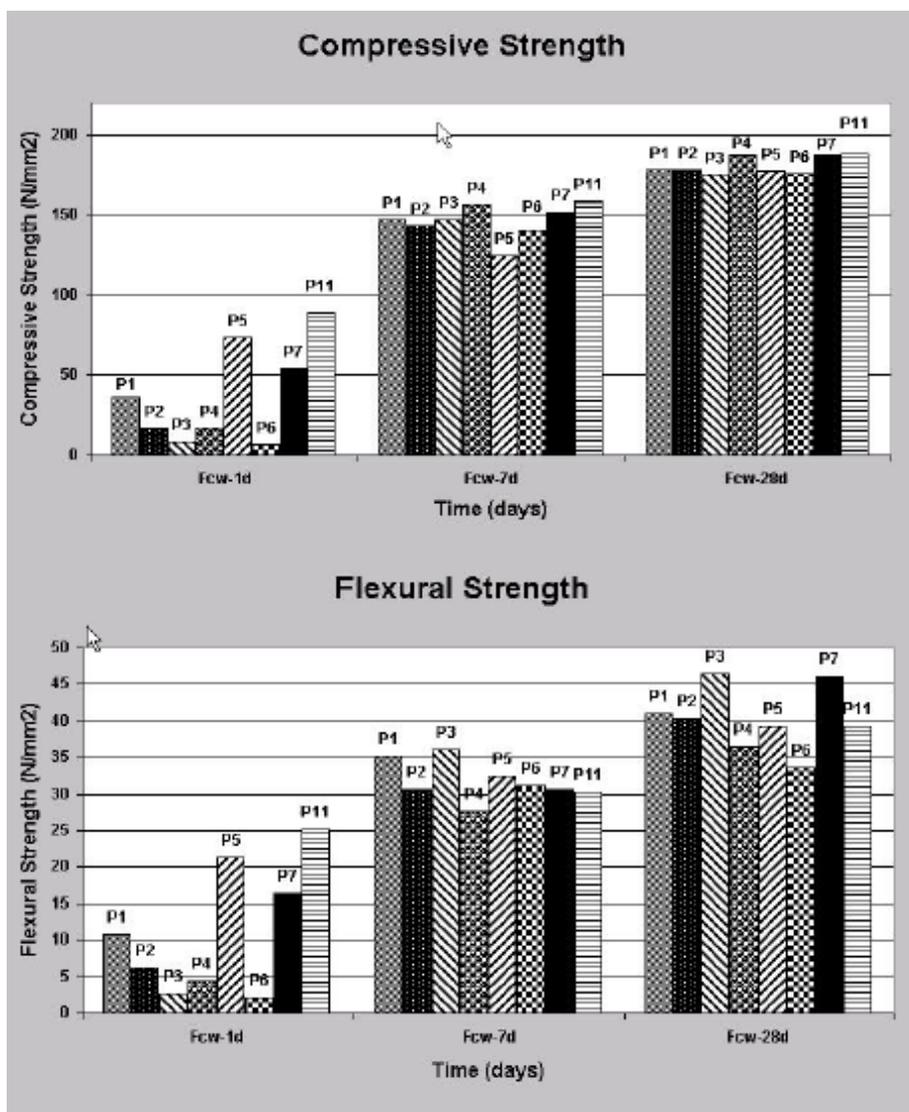


Figura 10 Efecto de diferentes SP sobre la resistencia a compresión y a flexión del HMAR [98].

2.2.12 Fabricación del HMAR.

La mezcla básica de HMAR fue diseñada por Richard, quien eliminó los áridos gruesos para mejorar la homogeneidad y microestructura del hormigón [101]. Posteriormente, Mounanga mejoró esta homogeneidad al incorporar cuarzo triturado como sustituto parcial del humo de sílice [102]. El proceso de fabricación de este tipo de hormigones suele ser el siguiente: primero se mezclan los componentes secos (cemento, humo de sílice, polvos de relleno y arena). A continuación, se añade el agua y el



superplastificante y, por último, si fuesen necesarias, se añaden las fibras, teniendo cuidado de que no se formen erizos.

Aunque para la fabricación de los HMAR se utilicen el mismo tipo de amasadoras que para fabricar los hormigones tradicionales, este tipo de hormigones requieren un mayor aporte de energía, por lo que el tiempo de amasado se ve incrementado. Los tiempos de mezclado para HMAR están, por norma general, por encima de los 10 min. Por otra parte, el incremento en la cantidad de cemento, así como el coste del resto de componentes encarecen sensiblemente su fabricación.

Los largos tiempos de mezclado del HMAR se deben esencialmente a que se utilizan relaciones w/c muy bajas ($<0,25$), altas cantidades de superplastificante y adiciones minerales finas. Además, para conseguir la resistencia deseada se requieren altas densidades de empaquetamiento que necesitan un mayor tiempo de amasado para conseguir una correcta dispersión de las partículas más finas.

Para tratar de reducir el tiempo de amasado se puede aumentar la velocidad de giro de la amasadora, optimizar la distribución del tamaño de partículas mediante la sustitución del cemento y la harina de sílice por humo de sílice y utilizar superplastificante con un peso molecular bajo [97].

En cuanto al proceso de fabricación del HMAR y el tipo de amasadora empleada, Chang determinó que, si el contenido de superplastificante es superior al 1,8% del peso del cemento, con un tiempo de mezcla suficiente, el orden en que se añaden los materiales y el tipo de amasadora utilizada tienen escasa influencia en la uniformidad de HMAR. Sin embargo, cuando la cantidad de superplastificante es inferior al 1,6%, el orden en que se añaden los materiales y el tipo de amasadora son factores que influyen sobre la homogeneidad y el tiempo de amasado del hormigón [103].

En cuanto a la mezcla, Abdulkareem ha investigado los diferentes parámetros que mayor influencia tienen a la hora de su diseño para garantizar que el HMAR sea lo más homogéneo y sostenible posible [104]. Estos parámetros son: el tipo de amasadora, el tipo de superplastificante y su dosificación, la relación de agua-conglomerante, la cantidad de humo de sílice y el tiempo de amasado.

Las mejores tecnologías de mezclado para obtener las propiedades mecánicas del HMAR deseadas se basan en realizar la mezcla al vacío a diferentes presiones [29]. Sin embargo, estas tecnologías son demasiado costosas para satisfacer la demanda de ingeniería a gran escala, por lo que los HMAR se fabrican utilizando amasadoras convencionales.



2.2.13 Proceso de curado del HMAR.

La aplicación de métodos de curado apropiados es esencial para un correcto rendimiento de cualquier hormigón pero especialmente para el HMAR. Debido a que los HMAR requieren una cantidad de agua reducida para su hidratación, hay que prestar mucha atención a su curado para evitar una pérdida del agua interna del hormigón antes de completar su hidratación.

Una vez fabricados los HMAR se someten a uno de los siguientes tratamientos: curado a temperatura ambiente (curado estándar), curado térmico a presión atmosférica o curado en autoclave. La razón de someter a los HMAR a diferentes tratamientos son [10]:

- El hormigón se fortalece más rápido, es decir, se produce una ganancia de resistencia a la compresión y a la tracción más temprana.
- El hormigón experimenta una reducción de la retracción y la fluencia.
- La durabilidad del hormigón se mejora sustancialmente.

Por otra parte, en las recomendaciones de la Association Française de Génie Civil (AFGC) [105] se pueden diferenciar dos tipos de tratamiento térmico que pueden aplicarse independientemente. El primero de ellos, es un tratamiento en autoclave a una temperatura moderada normalmente limitada a 65°C, porque a temperaturas más altas existe el riesgo de formación de etringita retrasada con la presencia de una alta humedad. Con este tipo de tratamiento se reduce principalmente el tiempo de fraguado. El segundo tratamiento consiste en colocar el hormigón, una vez que ha fraguado, en un recinto donde la temperatura se eleva gradualmente hasta 85-90°C y se mantiene a esa temperatura y una humedad relativa cercana al 100% durante uno o dos días. Debido a que este tratamiento se aplica después del fraguado del hormigón, es esencial tener conocimiento sobre el tiempo de fraguado de los hormigones. Este tipo de tratamiento afectará a las propiedades de los hormigones debido a un aumento de la cantidad de productos hidratados que se forman. Después del tratamiento, el hormigón habrá mejorado ciertos aspectos de su durabilidad, tendrá un mejor rendimiento mecánico a largo plazo y la retracción y la fluencia serán más reducidas.

2.2.13.1 Curado a temperatura ambiente (curado estándar).

El curado estándar consiste en conservar las probetas hasta inmediatamente antes de ensayar, bien en agua a una temperatura de 20°C ± 2°C, o en una cámara a 20°C ± 2°C y una humedad relativa



igual o superior al 95% [106]. Este tipo de curado es el más común, económico y respetuoso con el medio ambiente que se puede aplicar en la práctica. Aunque la resistencia a compresión que se obtiene con este tipo de curado suele ser inferior a otros tratamientos térmicos, varios estudios demostraron que si el tiempo de curado es lo suficientemente prolongado, generalmente de más de 180 días, se puede obtener una resistencia a compresión, para HMAR, superior a los 150 MPa [44, 56, 59, 107].

Wu ha demostrado que, con el contenido óptimo de cenizas volantes y escoria de horno alto, se pueden obtener resistencias a compresión y flexión, mediante curado estándar, comparables a las resistencias obtenidas con un curado térmico [26]. Esto implicaría una reducción de costes y energía durante la fabricación del HMAR.

2.2.13.2 Curado térmico a presión atmosférica.

Este tipo de curado se suele utilizar cuando se quiere conseguir unas mayores resistencias mecánicas a corto plazo. Para poder optimizar este sistema de curado hay que tener en cuenta el tipo de cemento empleado, el empleo de aditivos, las condiciones del tratamiento térmico, etc [17].

La resistencia a compresión del HMAR con curado térmico es superior a la obtenida después de un curado estándar [26, 27]. Soliman demostró que al someter el HMAR a un curado térmico durante 48 horas se podía obtener una resistencia a compresión similar a la que se obtiene mediante un curado estándar durante 28 días [18].

Los hormigones con humo de sílice, al ser sometidos a este tipo de curado, muestran un aumento considerable de la resistencia, en comparación con otro tipo de materiales cementicios suplementarios. Esto se puede deber a la alta reactividad puzolánica del humo de sílice lo que favorece la formación de CSH y CH cristalino. El polvo de vidrio, al igual que el SF, genera una alta reacción puzolánica. Por tanto, al curar térmicamente el HMAR que incorpora polvo de vidrio se consigue una microestructura más densa del CSH en la pasta del cemento y, por tanto, un desarrollo más rápido de la resistencia [72].

2.2.13.3 Curado en autoclave.

Este sistema de curado se realiza en autoclaves por el efecto del calor y del vapor a alta presión. El hormigón se somete a una temperatura de tratamiento del orden de 175°C, entre 8 y 48 horas, dependiendo de las resistencias finales que se quieran obtener. Debido a esto, se produce una reacción entre la cal liberada en la hidratación del cemento portland y los diferentes materiales finos de naturaleza



silíceas presentes en el hormigón. Este tratamiento es más efectivo cuanto mayor es la cantidad de sílice. Con este tipo de curado se pueden obtener altas resistencias iniciales, buena estabilidad de volumen y alta durabilidad [17]. Este tipo de curado tiene el inconveniente de requerir cámaras herméticas muy resistentes y de elevado precio, por lo que a menudo se suelen emplear tratamientos mixtos con una fase de curado al vapor a baja a presión y otro a alta presión.

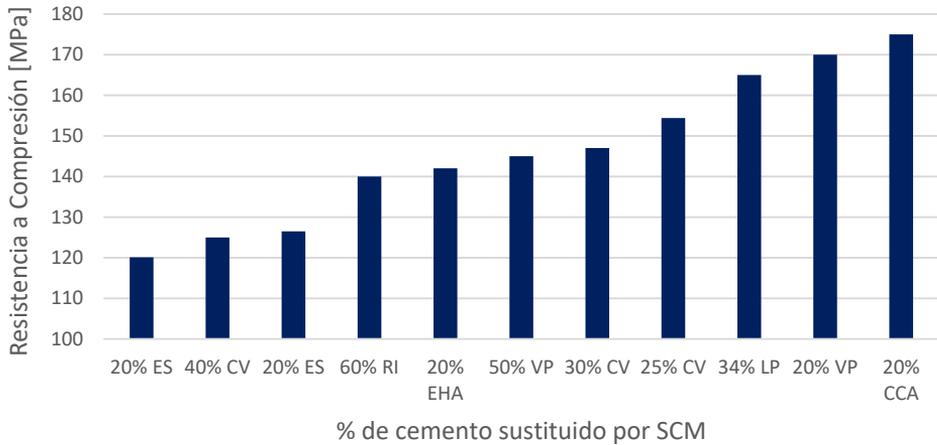
Con un curado en autoclave se consigue una mejora de la resistencia a compresión del HMAR, en comparación con otros tratamientos [52, 108]. Yalcinkaya ha demostrado que la resistencia a compresión que se obtiene con un curado estándar de 28 días se podría lograr sometiendo al HMAR a un curado en autoclave durante un periodo de tiempo inferior a 24 horas [52]. La utilización de CV como MCS tiene un efecto positivo sobre la resistencia a compresión bajo un curado en autoclave [95], gracias a la capacidad de la CV para acelerar la reacción puzolánica que se produce a medida que aumenta la temperatura.

Yazici ha determinado que las propiedades del HMAR, con alto contenido de CV o EHA y curado en autoclave o al vapor, mejoran considerablemente y, además, se obtiene un hormigón de alta densidad [108].

2.3 PROPIEDADES DEL HMAR CON RESIDUOS.

2.3.1 Resistencia a compresión.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, los HMAR se caracterizan por tener una resistencia a la compresión mucho mayor a los hormigones convencionales. Generalmente la resistencia a compresión típica de los HMAR está en torno a los 150-220 MPa, pero se pueden llegar a obtener mayores resistencias. La adición de fibra no tiene un efecto muy significativo sobre la resistencia final a compresión del HMAR, pero sí afecta a su comportamiento tensión-deformación [109]. En cuanto al tratamiento térmico, la resistencia a compresión que se obtiene mediante un curado estándar durante 28 días se podría lograr con un curado térmico durante 48 horas [18] o con un curado en autoclave durante menos de 24 horas [52]. Con la adición de diferentes MCS se llega a conseguir una resistencia a compresión, con valores iguales o superiores a los 120 MPa. Además, si se prolonga el tiempo de curado, se podrían obtener resistencias por encima de los 150 MPa [61, 107, 110]. En la **figura 11** y la **figura 12** se muestran los resultados de la resistencia a compresión, obtenidos en diferentes estudios, empleando diferentes MCS como sustitutos del cemento y/o del humo de sílice, respectivamente [22, 27, 51, 56, 59, 60, 61, 67, 69, 70, 72, 107, 108, 110].

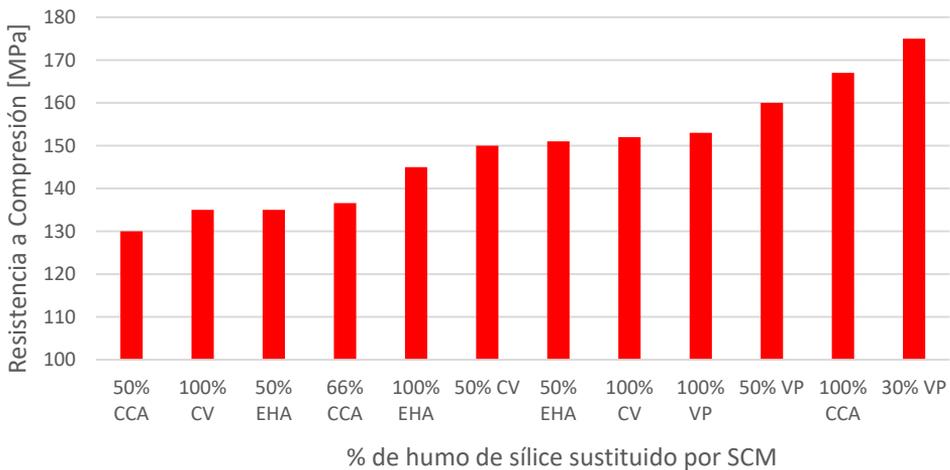


EC: escoria de cobre
CV: cenizas volantes

EHA: escoria de horno alto
IR: residuo industrial en polvo

CCA: cenizas de cascara de arroz
LP: piedra caliza

Figura 11. Resistencia a compresión del HMAR con diferentes porcentajes y tipos de MCS como sustitutos del cemento.



CCA: cenizas de cáscara de arroz
EHA: escoria de horno alto

CV: cenizas volantes
VP: vidrio en polvo

Figura 12. Resistencia a compresión del HMAR con diferentes porcentajes y tipos de MCS como sustitutos del humo de sílice.

Por otra parte, diferentes estudios han mostrado que es posible obtener unas resistencias a compresión por encima de los 130 MPa, realizando una sustitución total de los áridos naturales por diferentes clases de residuos como los residuos cerámicos [19], los residuos de vidrio reciclado [18, 41] y



diferentes escorias industriales [40, 41] (**figura 13**). Con el empleo de relaves de hierro sustituyendo el 100% árido, se han fabricado HMAR con resistencia a compresión por encima de 180 MPa [21].

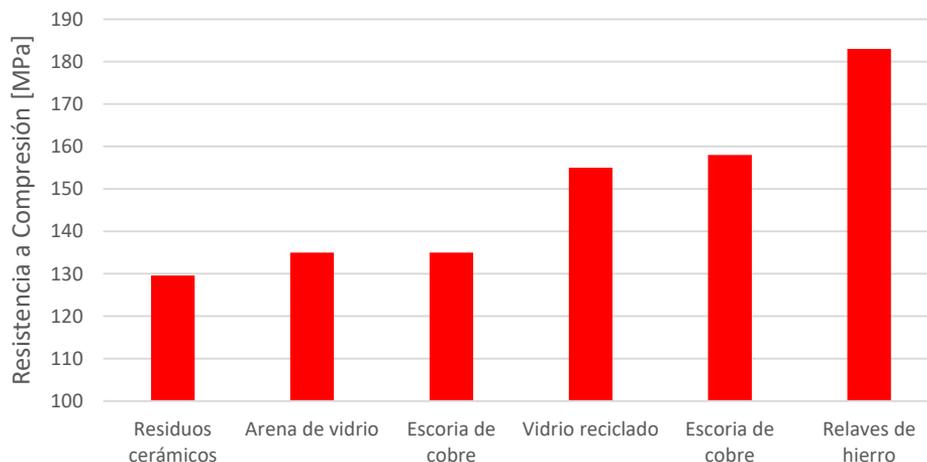


Figura 13. Resistencia a compresión del HMAR con sustitución total del árido por diferentes materiales.

2.3.2 Resistencia a la flexión.

Aunque la alta resistencia a la compresión distingue a los HMAR, su resistencia a la flexión es de mayor importancia [81, 82]. La adición de fibras de acero no sólo influye decisivamente sobre la resistencia a flexión sino que también mejora su capacidad de absorción de energía. Esto se debe a que las fibras son capaces de puentear las grietas que se van formando con la aplicación de la carga y, por tanto, se retarda su propagación. Por otro lado, la rotura del hormigón pasa de ser frágil a ser una rotura mucho más plástica. También, como es lógico, a medida que aumenta el porcentaje de fibra, la carga frente a la primera fisura y la carga máxima soportada por el HMAR se ven incrementadas [80].

Estudios consultados sobre el uso de escorias de horno alto (EHA) o cenizas volantes (CV), como sustitutos del cemento, han demostrado tener un efecto positivo sobre la resistencia a flexión del HMAR [23, 26, 52, 53]. En la **tabla 8**, se puede ver como la sustitución de hasta un 40% del cemento produce un incremento en la resistencia a flexión. Además, cuando se utilizan CV, se puede realizar una sustitución del 60% sin apreciarse una pérdida de resistencia. Este comportamiento se puede atribuir a la mejor fuerza de unión en los componentes del HMAR en presencia de CV. Sin embargo, como se muestra en la **figura 14** y la **figura 15**, a diferencia de lo que ocurre con la resistencia a compresión, el empleo de tratamientos térmicos durante el proceso de curado no produce un incremento de resistencia a flexión reseñable en los



hormigones fabricados con CV o EHA. Esto es, probablemente, debido a una unión más débil entre las fibras y la matriz después de estos tratamientos térmicos. Además, la alta temperatura o la duración del tratamiento térmico, afectan a las propiedades mecánicas debido a los coeficientes de expansión térmica de los diferentes componentes del hormigón. Esto conduce a un micro craqueo y a una mayor porosidad del HMAR. Por tanto, en el caso de HMAR que incorpora EHA o CV, con un curado estándar adecuado, se pueden reducir los costes de fabricación del hormigón sin sacrificar sus propiedades frente a esfuerzos de flexión.

Autor	Resistencia a flexión [MPa]	% de sustitución	HMAR [MPa]
Zemei Wu [26]	27,6	20% EHA	27,8
	39,4	40% EHA	
	25,6	60% EHA	
	36,9	20% CV	
	33,4	40% CV	
	31,4	60% CV	
H.Yazıcı [53]	34,5	40% EHA	28,6
	34,6	20% CV	
Yalçinkaya [52]	22,4	50% EHA	21,6
	21,9	30% CV	
R. Yu [23]	17,5	30% EHA	14,0
	15	30% CV	

Tabla 8. Variación de la resistencia a flexión del HMAR con EHA o CV.

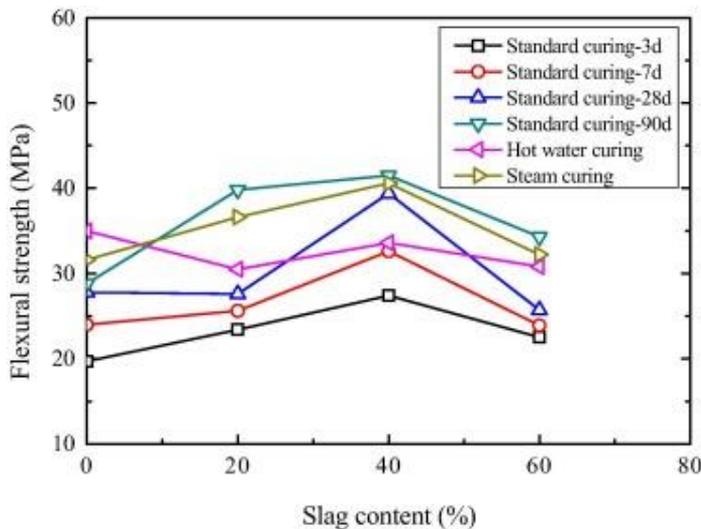


Figura 14. Efectos de diferentes sistemas de curado sobre la resistencia a flexión del HMAR con diferentes porcentajes de EHA [26].

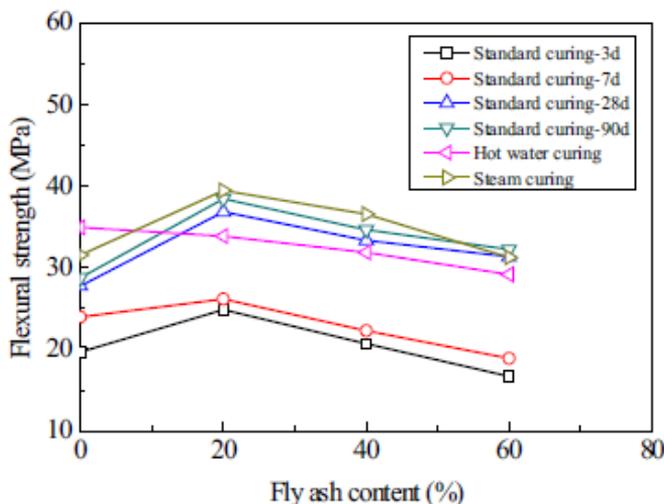


Figura 15. Efectos de diferentes sistemas de curado sobre la resistencia a flexión del HMAR con diferentes porcentajes de CV [26].

En otros estudios se ha analizado la posibilidad de utilizar otra clase de MCS, no tan comunes, y la influencia que pueden tener sobre la resistencia a flexión de los HMAR. Huang ha estudiado el empleo de cenizas de cascara de arroz (CCA), como un sustituto prometedor, del humo de sílice en la producción de HMAR [60]. La sustitución de hasta 5/6 de la cantidad del humo de sílice por CCA se puede realizar de forma satisfactoria sin producir cambios significativos en la resistencia a flexión.

En cuanto al empleo de áridos reciclados en los HMAR los valores de resistencia a la flexión se ven influenciados por el tipo de árido empleado [20, 21, 38, 40, 41, 44]. Estas variaciones en la resistencia son producidas por la diferencia en la calidad de los áridos, su porosidad y por la variación en la homogeneidad de la matriz del HMAR obtenida con cada uno de los materiales reciclados empleados. Tal y como se puede ver en **tabla 9**, el empleo de residuos industriales (relaves de hierro o escoria de cobre) tienen un comportamiento muy dispar [20, 21, 38, 40]. En el caso de los relaves de hierro se observan unas pérdidas de resistencia a flexión muy pequeñas para una sustitución del árido de hasta el 60% [21]. Sin embargo, cuando el residuo es escoria de cobre, se puede sustituir el 100% del árido sin perder resistencia [20, 40]. Otro material que se emplea como sustituto del árido son las cenizas volantes que se rechazan para la fabricación de cemento debido a su gran tamaño, superior a las 45 μm . Al utilizar estos residuos como sustitutos del árido, la resistencia a flexión experimenta un aumento significativo [44]. Se cree que esto es debido a su actividad puzolánica y el mejor enlace entre la pasta y las cenizas.



El empleo de tratamientos térmicos con altas temperaturas sobre HMAR con sustitución del árido, pueden mejorar en más de un 10% la resistencia a flexión del hormigón [41, 44]. Además, en el caso del HMAR con relaves de hierro sometidos a tratamientos térmicos, las resistencias a flexión obtenidas son comparables a las obtenidas durante 90 días bajo un curado estándar y superior a la resistencia del HMAR de referencia [38], tal y como se muestra en la figura 16.

Autor	Resistencia a flexión [MPa]	% Árido Reciclado	HMAR [MPa]
Zhu [21]	36,0	60% Relaves de hierro	38,0
S.L. Yang [41]	21,0	100% Vidrio reciclado	23,5
Kou [44]	24,0	15% CV desechadas	22,0
	25,0	30% CV desechadas	
	25,5	50% CV desechadas	
Zhao [38]	29,1	20% Relaves de hierro	29,7
	27,0	50% Relaves de hierro	
	24,3	100% Relaves de hierro	
P.S.Ambily [40]	32,4	100% Escoria de cobre	32,6
S.Al-Jabri [20]	14,4	50% Escoria de cobre	11,4
	14,8	70% Escoria de cobre	
	14,5	100% Escoria de cobre	

Tabla 9. Variación de la resistencia a la flexión en el HMAR con sustitución del árido natural.

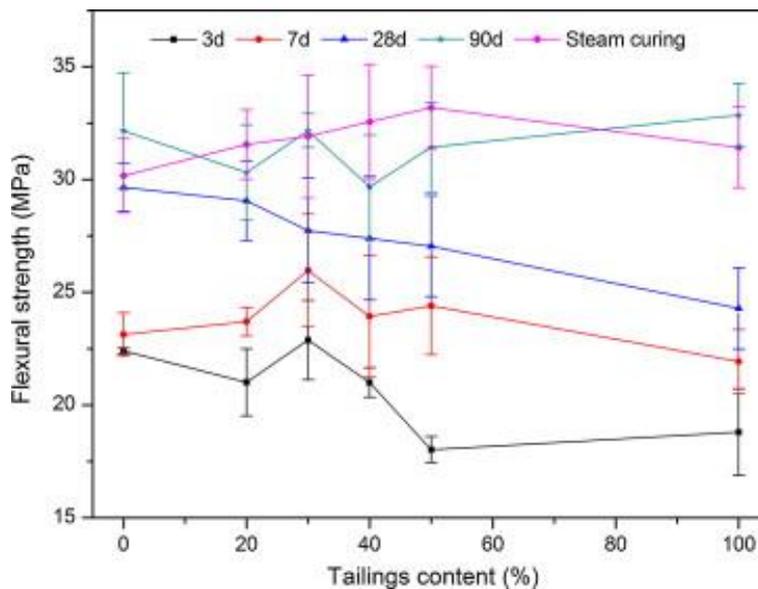


Figura 16. Resultados de la resistencia a la flexión de mezclas de HMAR bajo diferentes regímenes de curado [38].



2.3.3 Resistencia a la tracción.

Tal y como indica la AFGC en [10], el comportamiento a tracción de los HMAR se caracteriza por:

- Una etapa elástica limitada por la resistencia a la tracción de la matriz de cemento.
- Una etapa posterior a la fisuración caracterizada por la resistencia a tracción del material compuesto después de que la matriz se haya agrietado.

Al igual que ocurre con la resistencia a flexión del HMAR la resistencia a tracción se ve influenciada por la presencia o no de fibras en la mezcla. Se sabe que la resistencia a tracción se reduce después de la apertura de la primera fisura, lo que indica que las fibras no contribuyen a mantener las grietas unidas. Sin embargo, las fibras pueden aumentar la resistencia a la tracción más allá de la resistencia de la matriz, es decir, que se requiere una fuerza mayor para que se forme la primera fisura [34]. Mientras que en los HMAR sin fibra la resistencia a la tracción directa está comprendida entre 7 MPa y 10 MPa, la resistencia a la tracción puede duplicarse o triplicarse cuando las fibras se agregan a la mezcla [80]. Este aumento depende de la cantidad, el tipo y la orientación de las fibras [92].

Debido a que actualmente la literatura no es muy concluyente sobre como evaluar de forma efectiva la resistencia a la tracción de los HMAR, la AFGC y el Servicio de Estudios Técnicos de Rutas y Autopistas de Francia (SETRA) publicaron una serie de recomendaciones provisionales sobre HMAR [10, 111], donde se explican posibles métodos para determinar la resistencia a tracción del mismo. Varios estudios realizados por Aldahdooh reflejan un buen comportamiento a tracción de HMAR fabricados con alto porcentaje de cenizas de combustible de aceite de palma (CAP) como alternativa al cemento. La resistencia a tracción para una sustitución del 50% fue de 13,4 MPa, para ensayos directos, y 20,5 MPa, para ensayos indirectos, a los 28 días [65, 66].

Al igual que para los HMAR con MCS, los estudios sobre la influencia del uso de áridos reciclados sobre la resistencia a tracción son limitados. Gesoglu ha estudiado la influencia del uso de arenas naturales contaminadas con yeso. Las resistencias a tracción indirecta bajo diferentes tratamientos térmicos y con diferentes porcentajes de yeso se muestran en la **figura 17**. Se observa que mediante un tratamiento térmico la resistencia a la tracción mejora entre un 5% y un 16% dependiendo del contenido de yeso, debido a una activación de la reacción puzolánica y la reducción del tamaño de poro tras la aplicación de curado térmico al vapor [78].

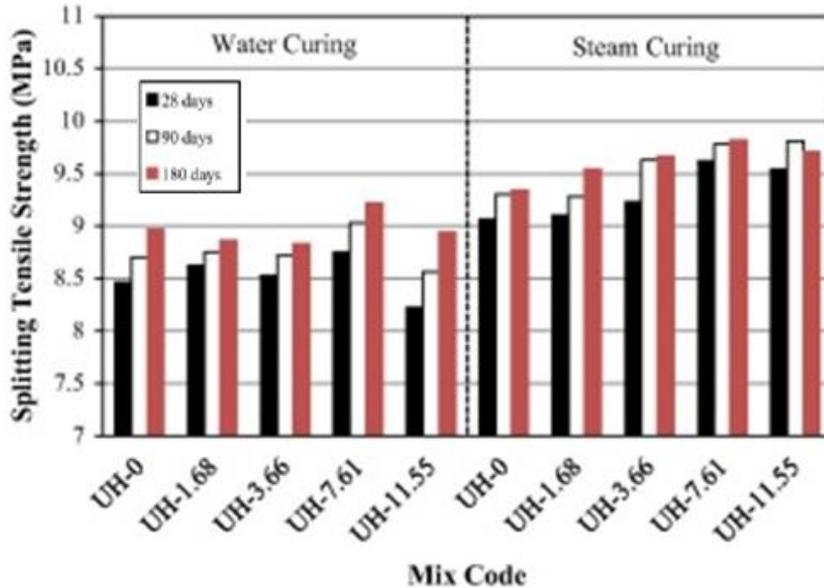


Figura 17. Efecto del método de curado sobre la resistencia a la tracción del HMAR [78].

Al-Jabri estudió la influencia del empleo de escoria de cobre como reemplazo de la arena más fina sobre la resistencia a la tracción. Como se aprecia en la **tabla 10** la adición de escoria de cobre mejora el comportamiento de los HMAR frente a esfuerzos de tracción. El incremento de resistencia varía entre el 10%, para una sustitución del 30% y el 19% para una sustitución completa del árido [20].

Autor	% Escoria de cobre	R. Tracción [MPa]	% Variación
S.Al-Jabri [20]	0,00%	4,7	0,0%
	30,00%	5,2	10,6%
	50,00%	5,5	17,0%
	70,00%	5,3	12,8%
	80,00%	5,5	17,0%
	100,00%	5,6	19,1%

Tabla 10. Variación de la resistencia a la tracción.

2.3.4 Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad es un parámetro importante en el diseño de estructuras de hormigón, ya que está relacionado directamente con el acortamiento que sufre el hormigón bajo esfuerzos de compresión. El elevado coste de los HMAR ha favorecido el uso de materiales locales o reciclados con la



intención de ahorrar energía y reducir su coste. Sin embargo, esta práctica puede generar una reducción en el módulo elástico del HMAR. Diferentes estudios muestran las variaciones que se producen en el módulo elástico de los HMAR, cuando se utilizan materiales reciclados [22, 37, 53, 65, 112]. Como se puede ver en la **tabla 11**, los resultados obtenidos en estos estudios son muy diversos. Cabe destacar que en los HMAR que emplean MCS, la reducción del módulo elástico nunca supera el 25%. Además, si los MCS empleados son algún tipo de cenizas, se observa un ligero aumento comprendido entre el 2% y el 6%. El empleo de áridos reciclados produce una reducción del módulo elástico significativa, llegando al 36% si el árido grueso es reemplazado en su totalidad.

Autor	% sustitución	Sustituye a	Módulo Elástico [GPa]		
			HMAR	HMAR reciclado	% Variación
Sukhoon Pyo [22]	25% cenizas de carbón	Harina de sílice	42	42,9	2%
	40% EHA	Cemento		43,1	3%
	25% CV	Harina de sílice		44,7	6%
Aldahdooh [65]	50% CAP	Cemento	-	46,72	-
H. Yazıcı [53]	20% CV	Cemento	56	57	2%
	10% CV y 10% EHA	Cemento		53	-5%
	30% CV y 10% EHA	Cemento		50	-11%
	40% EHA	Cemento		46	-18%
Ali [112]	25% Polvo de vidrio	Humo de sílice	52,8	40,4	-23%
Gonzalez-Corominas [37]	15% Cerámico fino	Árido fino	50,4	47,6	-6%
	30% Cerámico fino	Árido fino		49,9	-1%
	20% Árido reciclado	Árido grueso		43,9	-13%
	50% Árido reciclado	Árido grueso		38,4	-24%
	100% Árido reciclado	Árido grueso		32,4	-36%

Tabla 11. Valores del módulo elástico en los HMAR reciclados.

Yazıcı ha estudiado el efecto que tiene utilizar diferentes tipos de adiciones minerales como sustitutos del cemento sobre el módulo elástico de un HMAR curado en autoclave. Con una sustitución del cemento del 40% sólo se produce una disminución del 18% respecto al hormigón de control [53]. Esta reducción está relacionada con la pérdida de resistencia a compresión. Nassif también ha informado sobre esta pérdida en el módulo elástico cuando se utiliza humo de sílice o cenizas volantes, como adiciones puzolánicas en la fabricación de HAR [113].



Gonzalez-Corominas, por su parte, ha estudiado la influencia que tiene el árido reciclado sobre el módulo elástico de los hormigones de alto rendimiento [37]. El módulo elástico se ve más influenciado por el uso de áridos reciclados en comparación con otras propiedades del hormigón. En los hormigones con finos de árido cerámico se obtuvieron propiedades similares a los hormigones de referencia. Sin embargo, el empleo de áridos gruesos reciclados tuvo una influencia más negativa. Aunque todos los hormigones mostraron unos valores altos del módulo elástico, para una sustitución del 100% de los áridos gruesos por áridos reciclados se produce una caída del 35%.

2.3.5 Retracción.

En el caso de los HMAR, existen dos tipos de retracción. Por un lado, se encuentra la retracción por secado que es causada por la pérdida de humedad del HMAR y, por otro lado, la retracción química o autógena que es causada por una disminución en el volumen del HMAR a medida que los materiales cementicios se van hidratando [11]. La retracción por secado que experimentan los HMAR es muy baja debido a que este tipo de hormigones se caracterizan por tener una porosidad muy baja. Además, en caso del HMAR con fibras de acero, la retracción por secado del hormigón es bastante menor (para un 2% de fibra se produce una reducción del 27%) [114]. La retracción por carbonatación es prácticamente inexistente ya que, debido a su baja relación w/c y a su densa estructura interna, es muy difícil que el CO₂ penetre en el hormigón.

Debido a la gran cantidad de cemento presente en los HMAR, la retracción autógena es mucho más pronunciada en este tipo de hormigones, pudiendo alcanzar valores superiores a 0.0012 (1.2 $\mu\text{m}/\text{mm}$) [34]. Además de las altas dosis de cemento, el humo de sílice y una baja relación w/c contribuyen a que la mezcla sea más susceptible a este tipo de retracción. Este fenómeno, que ocurre a edades tempranas, induce a altos esfuerzos internos que, a su vez, causan microfisuras, aumentan la permeabilidad y, por lo tanto, reducen la durabilidad de las estructuras de hormigón [27]. Se ha demostrado que el uso de diferentes clases de MCS puede contribuir a la reducción de la retracción autógena [27]. Como se observa en la **figura 18**, el reemplazo del humo de sílice por cenizas volantes (CV) o escoria de horno alto (EHA) es una forma efectiva de reducir la retracción autógena del HMAR.

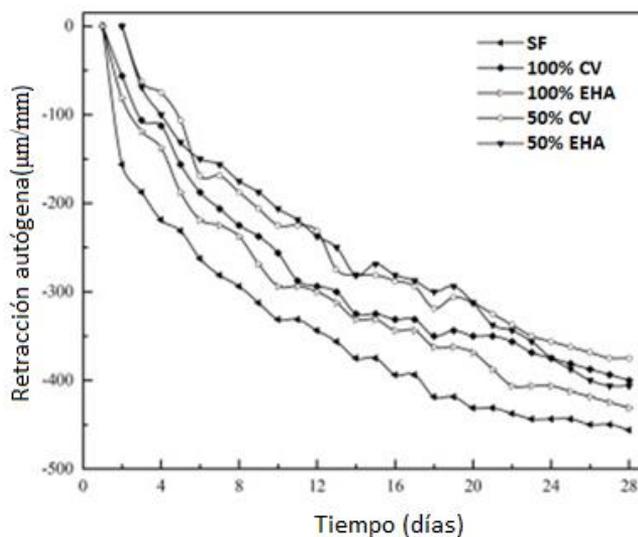


Figura 18. Retracción autógena del HMAR [27].

Varios estudios han demostrado que la sustitución parcial del cemento, hasta un 20%, por cenizas de cáscara de arroz (CCA) parece tener un efecto atenuante sobre la retracción autógena, ya que con su incorporación se consigue reducir y ralentizar significativamente la autodeshidratación del HMAR causada por los materiales cementicios [59, 63, 115]. Además, como se observa en la **figura 19**, la finura de las partículas influye sobre el grado de atenuación de este tipo de retracción. Puede apreciarse que las cenizas con un tamaño medio de partícula de $5,6 \mu\text{m}$ producen una reducción más significativa que las cenizas con un tamaño medio de partícula inferior a $3,6 \mu\text{m}$ o superior a $9,0 \mu\text{m}$. Estas cenizas parecían tener una superficie específica más alta y están mejor preparadas para absorber el agua que podría liberarse durante el proceso de autodesecación de estas mezclas con bajas relaciones w/c . La capacidad de las partículas de CCA para reducir la retracción autógena en mezclas con bajo contenido de w/c hace que este material de bajo coste sea una excelente alternativa al costoso humo de sílice para la producción de HMAR [63].

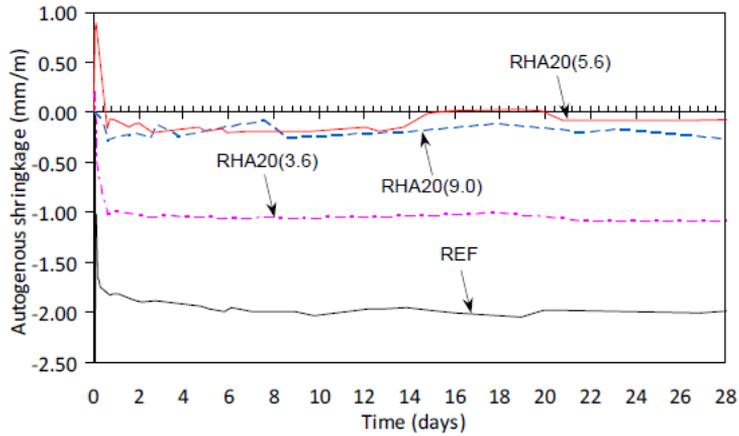


Figura 19. Retracción autógena del HMAR con CCA con diferentes tamaños de partícula [63].

Wang ha estudiado la fabricación de HMAR con materiales a base de coral reciclado (CR), y como este tipo de materiales reducen la retracción autógena [43]. La arena de coral, como sustituta de la arena natural, o el micro-coral, como sustituto del cemento, son dos tipos de CR que se pueden usar eficientemente en los HMAR para reducir la retracción gracias a su estructura porosa y al efecto del curado interno del coral. Además, como se puede ver en la **figura 20**, el uso combinado del micro-coral y la arena de coral (10c20C y 15c30C) es la forma más efectiva de reducir la retracción autógena.

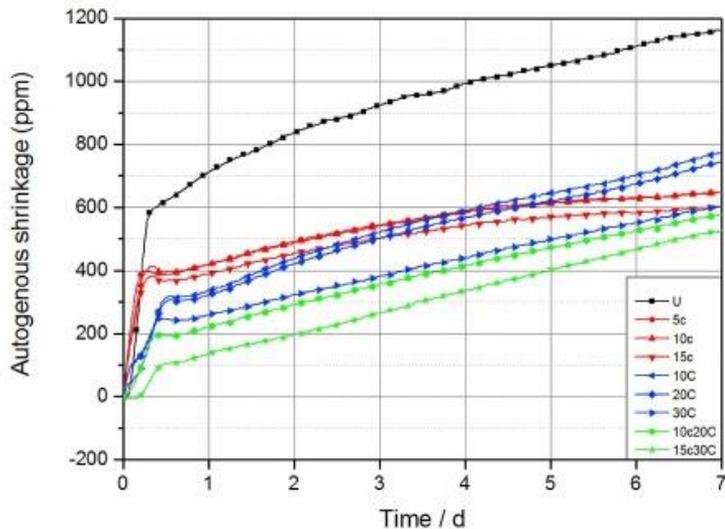


Figura 20. Resultados de la retracción autógena de diferentes mezclas con CR [43].



Por otro lado, debido a la presencia de sulfatos en las arenas naturales de muchas partes del Oriente Medio y la dificultad para encontrar arenas no contaminadas, se ha estudiado su empleo para la fabricación de HMAR [77, 78]. Al contrario que el resto de HMAR, en vez de presentar un problema de retracción con el paso del tiempo, la presencia de sulfatos produce una expansión del hormigón que podría contribuir a su fisuración. En la **figura 21** se muestra la expansión que experimenta el HMAR con un contenido de yeso comprendido entre el 1,68% y un 11,55%, del peso de la arena bajo diferentes tipos de curado. En la **tabla 12** se observa la cantidad de SO_3 presente en cada muestra. Se puede ver que en el caso de los HMAR, a diferencia de lo que ocurre en los hormigones convencionales, la máxima expansión que experimentan está muy por debajo del límite de seguridad. Estos resultados indican que los HMAR muestran una excelente resistencia al ataque interno por sulfatos bajo diferentes regímenes de curado [116]. Esto sugiere un alto potencial de empleo de áridos contaminados con yeso en los HMAR.

HMAR	% SO_3 en peso de la arena natural	% de yeso en peso de la arena natural
UH-0	0,11	0
UH-1,68	0,75	1,68
UH-3,66	1,5	3,66
UH-7,61	3	7,61
UH-11,55	4,5	11,55

Tabla 12. Relación entre el % de SO_3 y de yeso.

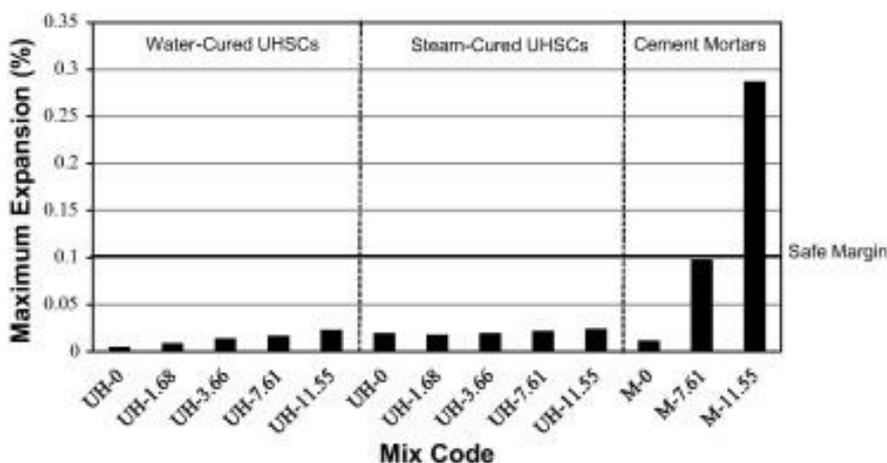


Figura 21. Máxima expansión de hormigones contaminados con yeso [78].



2.4 DURABILIDAD DEL HMAR CON RESIDUOS.

Como es sabido, el HMAR es un hormigón muy diferente a los que habitualmente se encuentran en las obras de ingeniería. Además de ser mucho más resistente que el convencional, tiene propiedades sobresalientes en términos de durabilidad. Esto permite que su uso sea muy interesante para la elaboración de estructuras en entornos altamente agresivos como depósitos de residuos, depósitos de productos químicos o para estructuras de la industria nuclear. Gracias a esta alta durabilidad, con los HMAR se pueden fabricar elementos estructurales de poco espesor, ya que su reducción se compensa con el incremento de su durabilidad. Esta mejora en la durabilidad del HMAR, en comparación con los hormigones convencionales, está relacionada con un mejor empaquetamiento de los materiales, una mayor densidad en la zona contacto entre la matriz y el árido y una estructura más densa de los productos de resultantes de la hidratación.

2.4.1 Permeabilidad, porosidad y absorción.

Debido a su bajísima porosidad, el coeficiente de permeabilidad típico del HMAR es aproximadamente 0,0005 a los 28 días; mientras que el coeficiente de permeabilidad del hormigón convencional es aproximadamente tres veces mayor [117]. Esta baja permeabilidad del HMAR se puede explicar gracias a la presencia de poros pequeños y discontinuos presentes en una mezcla más homogénea, compacta y densa que el resto de hormigones. Además, con el uso de superplastificantes se reduce la macro porosidad ya que favorece la fluidez y compactación del hormigón.

En cuanto a la porosidad y permeabilidad del HMAR se ve incrementada, por norma general, al emplear diferentes tipos de MCS, como se pone de manifiesto en diferentes estudios [22, 23, 72]. Este aumento se hace más notable a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución. Sin embargo, la diferencia de porosidad entre el HMAR con MCS y el HMAR de referencia, en ningún caso es superior al 4%. Por tanto, este aumento en la permeabilidad no tiene por qué causar una variación significativa en la durabilidad del HMAR. A diferencia del resto de MCS, el empleo de CCA produce un reducción en la porosidad y permeabilidad del HMAR [60]. Para un nivel de reemplazo de 2/3 del humo de sílice por CCA, la porosidad del HMAR es del 3,41% a los 28 días, mientras que para el HMAR de referencia es del 3,75%.

La permeabilidad, porosidad y absorción de los HMAR que sustituyen el árido natural por otra clase residuos reciclados también se ve incrementada, tal y como se ha puesto de manifiesto en diferentes estudios [18, 19, 38]. La porosidad del HMAR reciclado varía bastante en función de los materiales que se



utilicen. El empleo de relaves de mineral de hierro [38] produce un aumento en la porosidad de más del 90% cuando se sustituye el 100% del árido. Sin embargo, cuando se utilizan otros materiales, como vidrio reciclado [18] o residuos cerámicos [19], las variaciones que se producen, respecto al HMAR de control, son aproximadamente del 21% y del 32%, respectivamente. La porosidad del HMAR con reemplazo del árido natural en ningún caso es superior al 10%.

Por otra parte, como puede observarse en la **figura 22**, la adición de fibra también puede reducir la porosidad del HMAR.

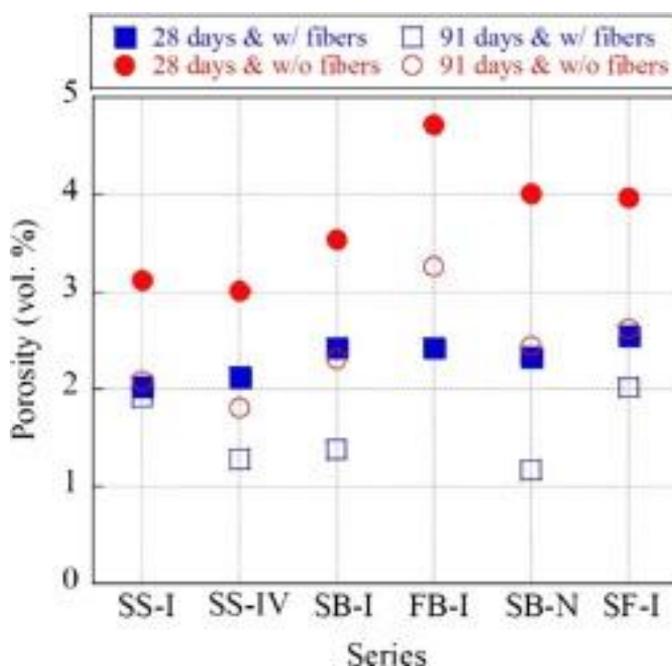


Figura 22. Porosidad del HMAR con diferentes MCS [22].

2.4.2 Resistencia a la penetración de cloruros.

En el caso del HMAR las mezclas con minerales podrían mejorar la resistencia a la penetración de cloruros. Se ha demostrado que el coeficiente de permeabilidad y el coeficiente de difusión del ion cloruro en los HAR y HMAR son mucho más bajos que en los hormigones convencionales [117]. Además, los HMAR suelen tener una permeabilidad a los cloruros por debajo de 100 C que se considera despreciable según los rangos establecidos en la ASTM C1202 [118]. Esto es a causa de la mayor densidad del HMAR, que evita la entrada de agentes externos como el agua o los iones cloruro [43].



Xinpeng Wang afirma que cuando se fabrica un HMAR con materiales a base de coral reciclado (CR), se puede mejorar la permeabilidad a los cloruros hasta un 30% con sustituciones del árido por coral reciclado de hasta el 30%. Además, la resistencia a la penetración de cloruros también se ve reforzada si se combina con una sustitución de 15% del cemento por micro corales [43].

Por otra parte, Huang afirma que la adicción de CCA como MCS es una forma de reducir la resistencia a la penetración de cloruros en el HMAR. Para una sustitución total del humo de sílice se puede reducir la penetración de cloruros en más de un 50% [60].

El empleo de áridos reciclados en HAR o HMAR produce un aumento de la cantidad de carga eléctrica que pasa a través del hormigón. Dicha carga se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de sustitución [37]. Sin embargo, todos los resultados muestran un nivel de corrosión bajo o muy bajo de acuerdo con los establecidos en la ASTM C1202 [118].

2.4.3 Resistencia a la carbonatación.

La carbonatación del hormigón puede reducir la alcalinidad del hormigón y destruir la película pasiva de la superficie del acero y, como resultado, hacer que se oxide fácilmente. En el caso de los HMAR, su baja relación w/c y su densa estructura interna dificultan que el CO₂ penetre en el hormigón. Por tanto, los HMAR tienen una excelente resistencia a la carbonatación [117].

2.4.4 Resistencia a las heladas.

Los ciclos hielo-deshielo son una de las principales razones del deterioro de las estructuras de hormigón en regiones de climas fríos. En el caso de los HMAR, su estructura interna más densa los hace más resistentes ya que dificulta la penetración del agua externa en el hormigón y, por tanto, se evita que se produzca su fisuración interna. Además, la incorporación de fibras de acero reduce sensiblemente la propagación de las fisuras en el caso que se produzcan [117].

Debido a la alta resistencia de los HMAR a los ciclos hielo-deshielo existen escasos estudios que analizan esta situación incorporando materiales reciclados. A este respecto, Smarzewski analiza la influencia de la utilización de residuos de fundición (WFS) como un componente del árido más fino y cenizas de carbón (CC) en sustitución del árido grueso en HAR [119]. En la **figura 23**, se puede observar cómo se produce una mayor pérdida de peso al emplear áridos reciclados como sustitutos parciales de los áridos.



La pérdida de peso es 4 veces superior cuando se realiza una sustitución del 30% de árido grueso (CC30), respecto al HAR de referencia (C0).

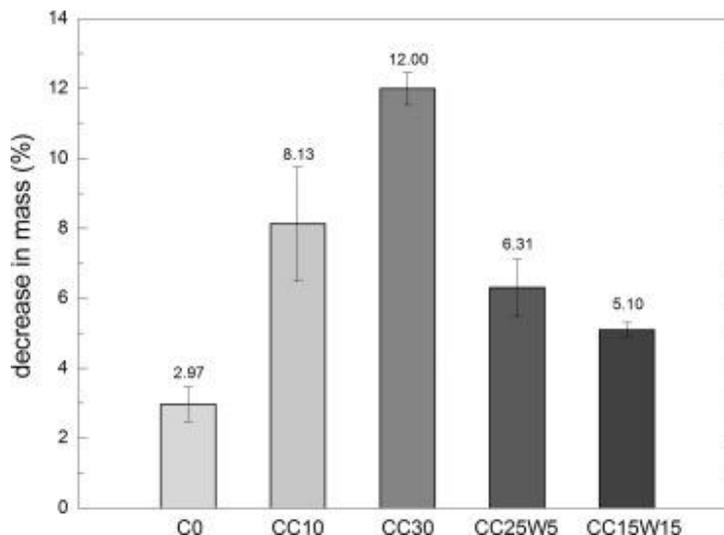


Figura 23. Disminución relativa del peso después de un ciclo hielo-deshielo [119].

Por otra parte, Zegardlo ha obtenido resultados similares cuando se utilizan residuos cerámicos como sustitución total del árido en HMAR [19]. Esta pérdida de resistencia en los ciclos hielo-deshielo es debida al alto grado de absorción de agua por parte del árido cerámico.

2.4.5 Resistencia al fuego.

Sobre este aspecto, se ha demostrado que al someter diferentes tipos de hormigones a altas temperaturas, la rotura se produce a 690°C para los hormigones convencionales, a los 600°C para los HAR, y a los 790°C para los HMAR. Como se muestra en la **figura 24**, la menor resistencia al fuego del HAR está relacionado con un aumento más rápido de su temperatura interna durante el ensayo de resistencia al fuego [120]. También se ha descubierto que las temperaturas internas de las muestras de HMAR son considerablemente más altas que para el resto de hormigones cuando se sometían a la misma temperatura y duración del fuego. Esto indica que la diferencia de temperaturas entre el centro y la superficie periférica del HMAR es baja generando un menor estrés térmico interno y provocando que los HMAR presenten una resistencia al fuego más elevada que otra clase de hormigones [117, 120].

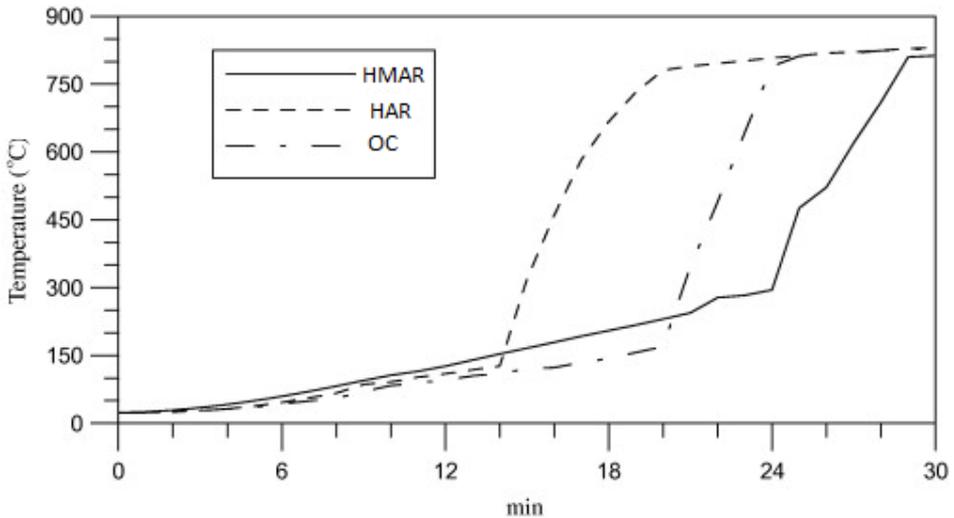


Figura 24. Variación de la temperatura interna de los diferentes tipos hormigón durante los primeros 30 minutos [120].

Ali sometió al HAR, fabricado con polvo de vidrio reciclado como MCS, a diferentes ensayos para examinar su resistencia al fuego [112]. La degradación de sus propiedades mecánicas tardó más en manifestarse en el HAR con vidrio reciclado. En cuanto al desprendimiento del hormigón a alta temperatura, en el caso del HAR reciclado se produjo a partir de los 500°C mientras que para el HAR de control se produjo a los 400°C. Por estas razones, se puede considerar la utilización de polvo de vidrio reciclado para incrementar la resistencia del HAR a altas temperaturas.

2.5 APLICACIONES DEL HMAR.

El empleo de HMAR es especialmente adecuado para estructuras prefabricadas, pero su uso como hormigón fabricado in situ también es apropiado. Las áreas más adecuadas para el uso de este tipo de hormigones incluyen [121]:

- Estructuras o elementos estructurales sometidos a entornos agresivos.
- Estructuras o elementos estructurales situados en zonas de alta actividad sísmica, de grandes luces o para las cuales la reducción peso/resistencia es interesante.
- Estructuras sometidas a efectos de choque, estructuras en las que se busca una alta calidad.
- Estructuras compuestas. El HMAR tiene una relación resistencia/módulo de elasticidad muy interesante para usarse en combinación con acero o fibra de carbono. Además, la casi ausencia



de deformaciones diferidas en el material, fluencia o retracción, hace que su uso en estructuras compuestas sea particularmente relevante.

- Estructuras o elementos estructurales para las cuales la complejidad y la densidad de la armadura pasiva tradicional presentan un diseño complejo (conexión a una estructura existente con una geometría con dificultades de acceso, conexión mecánica a estructuras de acero complejas).

El HMAR puede utilizarse en otros campos. A este respecto, Ductal ® está utilizando el HMAR prefabricado como paneles de revestimiento frente a la lluvia, paneles de fachada o para cubiertas prefabricadas [122]. Al utilizar paneles prefabricados de HMAR se consigue un buen aislamiento térmico con espesores reducidos, una mayor resistencia, un aumento de la durabilidad frente al desgaste con el paso del tiempo y mayor libertad de diseño.

The Italian Lab UHPC, como muestra en su página web, ha conseguido utilizar el HMAR para producir mobiliario urbano y de interior, para revestimientos y recubrimientos decorativos así como para paneles de fachada de alta calidad [123].

2.5.1 Aplicaciones reales del HMAR.

A continuación, se describen algunas de las obras más relevantes realizadas con este tipo de hormigones.

EUROPA

Los puentes de Bourg-Les-Valence, construidos en el año 2001, en Francia, son los primeros puentes de carretera fabricados con HMAR. Cada puente consta de dos tramos continuos con una conexión de HMAR ejecutada in situ. La sección transversal consiste en cinco vigas pretensadas empalmadas que se asemejan a una doble T con la adición de bridas inferiores similares a una sección en forma de pi. Las longitudes de las vigas son de 20,5 y 22,5 metros. Se usó HMAR en las juntas longitudinales existentes entre vigas.

El puente de St. Pierre La Cour, construido en el 2005, en Francia, consta de 10 vigas en U prefabricadas de HMAR pretensado, con un tramo simple de 19 m. El tablero está construido con paneles prefabricados de HMAR de 25 mm de espesor y una plataforma ejecutada in situ de 200 mm de espesor.



La presa Caderousse del río Rhône, en Francia, se reparó en 2010 utilizando HMAR con fibra de acero. La reparación se realizó sin juntas de construcción.

En Alemania, los primeros puentes de HMAR se construyeron en Niestetal cerca de Kassel con vanos de 7, 9 y 12 m. El puente Gärtnerplatz, construido en el año 2007, es una pasarela sobre el río Fulda en Kassel. Es una estructura de seis vanos con una longitud total de 133,2 m y una luz en el vano principal de 36 m (**figura 25**). El sistema estructural es una armadura espacial de canto variable que consta de dos cordones superiores fabricados con HMAR y un cordón inferior de acero tubular. Los cordones diagonales de acero de sección tubular están dispuestos de manera inclinada tanto longitudinal como transversal. Las losas de la calzada tienen un ancho de 5 metros y están dispuestas en voladizo sobre los cordones superiores.



Figura 25. Gärtnerplatz Bridge, Kassel, Germany [124].

En Holanda el HMAR se utilizó para la rehabilitación del tablero del puente de Caland, mediante una capa de 5 cm de espesor. Esta es una solución muy prometedora, ya que convierte la plataforma del tablero en una construcción mucho más rígida que permitirá extender la vida útil del puente sin mantenimiento adicional.

El puente Wild-Brücke de Mühlgraben (**figura 26**), en Austria, es el primer puente en arco construido con HMAR con fibras. La estructura está formada por dos arcos paralelos apuntalados que



conectan los lados del valle con una luz libre de 70 metros. La longitud total de la estructura del puente es de 157 metros. Ambos arcos están compuestos por seis vigas cajón prefabricadas de HMAR de 16 metros de longitud. Los pilares se fabricaron in-situ. Entró en servicio el año 2010.



Figura 26. Puente Wild-Brücke de Mühlgraben, en Austria [125].

Los Viaductos de Chillon, en Suiza (**figura 27**), inaugurados en 1969 han sido actualizados recientemente para garantizar que cumplen con los nuevos estándares de resistencia, reparar los defectos causados por la penetración de agua, hacerlos más impermeables al agua y mejorar sus propiedades estructurales. Para ello, se ha vertido una capa de 45 mm de HMAR sobre la plataforma existente.



Figura 27. Viaductos de Chillon, en Suiza [126].



En Suiza, el HMAR se está utilizando para la rehabilitación de estructuras de hormigón. La idea principal es usar HMAR para reforzar aquellas partes de las estructuras que están expuestas a un entorno agresivo y a un alto esfuerzo mecánico mientras que el resto de la estructura continúa siendo de hormigón convencional. El HMAR también se está utilizando en Suiza como capa exterior de las barreras de protección frente a impacto de los puentes de carretera, para la rehabilitación de los pilares de los puentes mediante revestimientos prefabricados y para el refuerzo del forjado de edificios [127].

En Eslovenia, en el año 2009, se utilizó HMAR para la rehabilitación de un puente en el valle del río Soča. La rehabilitación consistió en superponer sobre la parte superior del tablero del puente una capa de HMAR de 2,5 cm a 3 cm de espesor.

La pasarela ubicada en la desembocadura del Barranco de las Ovejas (**figura 28**) construida en el año 2013, en Alicante, es la primera construcción con HMAR en España. Esta innovadora pasarela de 42,81 m de luz reemplazó al diseño original en acero, manteniendo el peso de la estructura inicialmente proyectada y reduciendo prácticamente a cero los costes de mantenimiento. La estructura se resolvió mediante una doble celosía Warren modificada de canto variable, conectadas ambas mediante una celosía inferior y un tablero intermedio de 3 m de ancho. Además, se trata de la primera pasarela en celosía del mundo realizada íntegramente con hormigón de muy alto rendimiento [128].



Figura 28. Pasarela de HMAR sobre el Barranco de las Ovejas, España.

La pasarela para peatones y ciclistas sobre la V-21 (**figura 29**) entró en servicio en el año 2014, en Puçol, España. Es una estructura de sección en cajón prefabricado en HMAR de canto constante, con almas aligeradas en forma de celosía y un tablero formado por losas apoyadas en riostras, que forman la base de la estructura principal. Además, se trata de la primera pasarela puesta en servicio con tablero ejecutado íntegramente con Formex®, que es un material de matriz cementicia de ultra alto rendimiento reforzado con fibras.



Figura 29. Pasarela Formex® Howe sobre la V-21, España.

La pasarela peatonal para visitantes del parque industrial de la empresa Ribera del Xuquer Recycling (**figura 30**), ubicada en el pueblo de Guadasuar, en España fue construida en el año 2016. Se trata de una estructura prefabricada tipo cercha, construida en HMAR y apoyada en pilas prefabricadas de sección circular ejecutadas en hormigón armado tradicional y colocadas de manera inclinada para conseguir un apoyo en forma de “V”. La pasarela queda configurada en planta por una sucesión de vanos rectos, con forma de Y. El tramo recto de mayor longitud alcanza un total de 75 metros, compuesto por 4 vanos. En un punto intermedio de este tramo, arranca un tramo ortogonal a éste con una longitud de 37,3 metros compuesto por dos vanos.



Figura 30. Pasarela peatonal de Guadasuar, España.



AMÉRICA DEL NORTE

El primer puente de carretera construido en América del Norte con HMAR fue el puente Mars Hill, en el condado de Wapello, Iowa en el año 2006. Se trata de un puente de un solo vano, como se muestra en la **figura 31**, Está construido con tres vigas de HMAR pretensado de 33,5 m de luz. El tablero está fabricado in situ.



Figura 31. Mars Hill Bridge, Wapello County, IA [11].

En 2008 se construyó un puente de HMAR con vigas en forma de pi en el condado de Buchanan, Iowa (véase la **figura 32**). Se usaron tres vigas pi de HMAR en el tramo central de 15,6 m de luz.



Figura 32. Jakway Park Bridge, Buchanan County, IA [11].

El primer puente con HMAR en Canadá fue la pasarela de Sherbrooke, Quebec, como se observa en la **figura 33**. Fue construida en el año 1997 y el concepto estructural consiste en una armadura espacial con un cordón superior de HMAR que sirve como superficie de conducción, dos cordones inferiores de



HMAR y un conjunto de diagonales que se inclinan en dos direcciones. Cada diagonal está construida mediante HMAR confinado en tubos de acero inoxidable de 152 mm de diámetro.



Figura 33. Pedestrian bridge, Sherbrooke, Quebec, Canada [11].

En el año 2013 comenzó la construcción del Nipigon River Bridge en Ontario, Canadá. Se trata de un puente atirantado de cuatro carriles con tres torres centrales prefabricadas de hormigón que soportarán la plataforma de puente de 252m de longitud (**figura 34**). La conexión entre los diferentes segmentos de las torres y las juntas, longitudinales y transversales, fueron realizadas con HMAR.



Figura 34. Nipigon River Bridge en Ontario, Canadá [126].



ASIA Y AUSTRALIA

El puente Shepherds Creek en Australia fue construido entre el año 2002 y el año 2004 para reemplazar un viejo puente de madera, con una luz de 15 m y 21 m de ancho. Cuenta con 16 vigas de HMAR que soportan paneles prefabricados de HMAR de 25 mm de espesor y una plataforma reforzada de 170 mm de espesor del mismo material (véase la **figura 35**).



Figura 35. The Shepherds Creek bridge, Australia [129].

En Japón, se han construido numerosos puentes con HMAR comenzando con el puente Sakata-Mirai en el año 2002 (**figura 36**). Se trata de la primera pasarela de HMAR construida en Japón y está formada por varios tramos de vigas cajón postesadas de HMAR. La mayoría de las pasarelas de HMAR en Japón consisten en varios tramos de vigas en U prefabricadas con un tablero superior conectado a ellas. Los tramos de vigas en U se conectan longitudinalmente mediante juntas ejecutadas in situ y se tensan.



Figura 36. Sakata-Mirai bridge, Sakata, Japan [11].



El puente Horikoshi Highway C-Ramp fue el primer puente de autopista en el que se usó HMAR. Fue construido en 2005 y está compuesto por cuatro vigas pretensadas de HMAR en T y un tablero de hormigón realizado en obra. El uso de HMAR en las vigas permitió la reducción del número de vigas de 11 a 4. El peso total del puente se redujo en un 30%.

La construcción de la Pista D en el Aeropuerto Internacional Haneda de Tokio construida entre el 2007 y 2010, utilizó losas de HMAR de 250 mm de ancho y dispuestas sobre un conjunto de vigas de acero sobre el río Tama (véase la **figura 37**). Las losas de HMAR soportan el tablero de la pista del aeropuerto. Esto redujo la carga muerta de la losa en aproximadamente un 56% en comparación con el hormigón convencional. Aproximadamente 6900 losas fueron necesarias para esta aplicación.



Figura 37. Haneda International Airport, Tokyo [130].

El puente peatonal Sunyudo (Peace) en Corea del Sur es un puente en arco con una luz principal de 120 m (ver **figura 38**). Fue construido en el año 2002, mediante seis secciones prefabricadas postesadas con sección en pi de 1,30 m de espesor. Las seis secciones prefabricadas se tensan mediante tendones ubicados en la parte superior e inferior de la sección. Este puente es el de mayor luz en el mundo construido con HMAR.



Figura 38. Footbridge of Peace, Seoul, South Korea [11].

2.6 **NORMATIVA EXISTENTE SOBRE HMAR.**

2.6.1 **Normativa sobre HMAR.**

Aunque la normativa que existe sobre los HMAR actualmente es escasa., numerosos países están comenzando a realizar su estandarización. Con ello se permite establecer especificaciones claras y codificadas sobre los HMAR.

En Francia, la organización nacional francesa para la estandarización (AFNOR) ha desarrollado la norma **NF P18-470**, Hormigón reforzado con fibra de ultra alto rendimiento: especificaciones, rendimiento, producción y conformidad [131] y la norma **NF P18-710**, Complemento nacional al Eurocódigo 2. Diseño de estructuras de hormigón: Reglas específicas para hormigón reforzado con fibra de ultra alto rendimiento[132]. Además, cabe señalar que se está elaborando la norma **NF P18-451** [133], donde se establecen las reglas para la ejecución de estructuras fabricadas con HMAR.

En USA, la ASTM ha implementado la norma **C1856/C1856M-17** Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete [134]. En esta norma se incluyen los procedimientos para determinar las propiedades del HMAR.

En China, la Administración de la Supervisión de Calidad, Inspección y Cuarentena (AQSIQ) y la Administración de Estandarización (SAC) ha publicado en el 2015 la norma **GB/T 31387** Reactive Powder Concrete [135]. Esta norma se aplica a los HMAR, prefabricados o fabricados in situ, y establece los procedimientos para su clasificación y etiquetado, las materias primas a utilizar, el diseño de la mezcla, su



preparación y transporte, los métodos de conservación, los métodos de ensayo y las reglas para su inspección.

En Canadá aunque actualmente no existe normativa sobre los HMAR, la Canadian Standards Association (CSA) creó, en 2015, un nuevo grupo de trabajo sobre HMAR con el objetivo de desarrollar un nuevo anexo relativo al mismo en la norma **CSA23.1/A23.2**, Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete [136]. Este nuevo anexo cubrirá diferentes aspectos sobre los HMAR como la clasificación, la caracterización, las materias primas utilizadas, la dosificación, la producción, el transporte, etc. La CSA tiene como objetivo que este anexo, una vez aprobado, se publique en la edición de 2019.

2.6.2 Guías técnicas y recomendaciones.

Además de la normativa sobre HMAR mencionada anteriormente, existen diferentes guías técnicas y recomendaciones profesionales de uso para los HMAR. Sin embargo, estos documentos, al no tener un carácter oficial, no son de obligado cumplimiento para su uso en proyectos. Entre las guías de recomendaciones cabe destacar:

- Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams (Australia) [137].
- Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures redactada por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles. [138].
- Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Interim Recommendations preparadas por AFGC (Asociación francesa de ingenieros civiles) y SETRA (Agencia gubernamental francesa de carreteras y tráfico [10].
- Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)- Materials, design and execution editada por la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos (SIA) [139].

Por otra parte, el Grupo de Trabajo 8.6 de la Fédération Internationale du Béton (fib) está desarrollando recomendaciones adaptadas al diseño de estructuras con HMAR [140]. En este documento se informa sobre las particularidades de este tipo de hormigones y de las mejoras que se producen en las propiedades físicas y mecánicas.

Las directrices australianas se desarrollaron para el diseño de vigas de hormigón pretensado fabricadas con Ductal®. Se adopta, cuando es posible, un enfoque de estado límite coherente con los



requisitos de diseño de la “Australian Standard for Concrete Structures AS3600-1994” [141]. Las propiedades de diseño que se abordan son el comportamiento a compresión, el módulo de elasticidad, la densidad, el coeficiente de Poisson y el comportamiento frente a la fluencia y a la retracción. Además, se proporcionan pautas de diseño para la resistencia a la flexión, la resistencia a la cizalladura, la resistencia a la torsión, el control de grietas por flexión en servicio, la flecha en servicio, la pérdida de pretensado y el diseño de las zonas de anclaje.

Las recomendaciones publicadas en las “Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures” por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles en 2006, proporcionan principios básicos para el diseño y la construcción usando HMAR. Aportan los valores de diseño de resistencia a compresión, resistencia a la fisuración, resistencia a la tracción, relación tensión-deformación, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, características térmicas, retracción, fluencia y fatiga. En otros capítulos del documento se abordan la seguridad estructural, la capacidad en servicio, detalles estructurales, etc. Las recomendaciones se basan en las “Standard Specifications for Concrete Structures” establecidas por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles [142].

En la guía técnica denominada “Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)” se pretende regular el diseño y el dimensionamiento de estructuras fabricadas con HMAR. Esta guía se basa en la normativa estructural de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos.

Las recomendaciones francesas se componen de tres partes [10]. La primera parte proporciona especificaciones sobre las propiedades mecánicas que se obtendrán, los procedimientos para la colocación del HMAR y los controles e inspecciones durante la construcción y del producto terminado. La segunda parte trata sobre el diseño y análisis de estructuras fabricadas con HMAR y se considera el uso de fibras, de refuerzos no pretensados y de elementos no reforzados. La tercera parte trata sobre la durabilidad del HMAR. Entrando un poco al detalle de cada una de las partes del “Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Interim Recommendations”:

- La primera parte proporciona información de diseño respecto a resistencia a: la compresión, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, el coeficiente de expansión térmica, la retracción, la fluencia y el comportamiento frente a impactos. También se aborda el diseño de la mezcla, los procedimientos de mezcla y de colocación.



- En la segunda parte se abordan los métodos de diseño basándose en los códigos franceses para hormigón pretensado y reforzado, teniendo en cuenta la resistencia proporcionada por las fibras. Las recomendaciones incluyen un contenido mínimo de fibra y una verificación para evitar rotura frágil. Las tensiones en el estado límite de servicio se tratan de la misma manera que en las estructuras reforzadas o pretensadas convencionales.
- En la tercera parte abordan aspectos de la durabilidad del HMAR como: la porosidad al agua, la permeabilidad al oxígeno, la difusión del ion cloruro, el contenido de portlandita, la estabilidad de las mezclas, la hidratación retardada, la corrosión de las fibras de acero y la durabilidad de las fibras del polímero.

La Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción (RILEM) también publicó en el año 2003 un documento con recomendaciones sobre el diseño y los métodos de ensayo para los hormigones convencionales reforzados con fibra [143], aunque estas recomendaciones también se pueden aplicar a los HMAR.

Aparte de las guías técnicas mencionadas anteriormente, en 2015, el American Concrete Institute (ACI) formó el subcomité ACI 239 C "Structural Design of Ultra-High Performance Concrete" con el objetivo de desarrollar una nueva guía de diseño estructural. El subcomité está formado por expertos internacionales en HMAR y tiene como objetivo que el documento esté finalizado en 2018. Será la primera guía de diseño estructural para HMAR en América del Norte.



CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL. MATERIALES, CRITERIOS Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

3.1 INTRODUCCIÓN.

El programa experimental llevado a cabo comienza con la selección de los materiales utilizados y una descripción de sus características y propiedades.

En los siguientes apartados, se realiza una descripción de la metodología puesta en práctica para la caracterización de los materiales y del Hormigón de Muy Alto Rendimiento con Fibras de acero (HMARF) fabricado incorporando residuos procedentes de la minería y de la industria siderúrgica. Además, se describen los ensayos realizados para determinar aquellas propiedades que pueden verse afectadas por la incorporación de los residuos.

En primer lugar se han determinado las características de los materiales que conforman el HMARF y los métodos de ensayo seguidos para su caracterización. A continuación, se describe de forma detallada el procedimiento seguido para la sustitución de diferentes componentes del HMARF por diferentes clases de materiales reciclados y el proceso de fabricación empleado en cada una de las amasadas.



Por último, se describe de forma detallada la metodología seguida para caracterizar el HMARF tanto en estado fresco como endurecido detallando aquellos procedimientos específicos que no siguen el cauce operativo habitual dictado por la normativa.

3.2 MATERIALES.

En este estudio se han utilizado, aparte de los materiales básicos constituyentes del HMARF, diferentes tipos de áridos procedentes de minas de fluorita y varios tipos residuos de granito como sustitución parcial o total de la arena, de la harina de sílice. En los apartados siguientes se describen las características y particularidades de todos ellos.

3.2.1 Cemento.

El cemento empleado fue el CEM I 42,5 R/SR. Fue suministrado por la empresa Lafarge-Holcim S.A. en sacos de 35 kg. Fue almacenado en bidones de plástico con cierre hermético para evitar su deterioro con el paso del tiempo.

Sus propiedades físicas y químicas cumplen con las recomendaciones de la EHE-08 [16] y la Instrucción para la recepción de cementos RC-16 [33]. En la **tabla 13** se muestran sus principales características.

CEM I 42,5 R-SR	
Composición	
Clinker	95-100%
Componentes minoritarios	0-5%
Prescripciones	
Pérdida por calcinación	≤ 5,0%
Residuo insoluble	≤ 5,0%
Sulfatos	≤ 3,5%
Cloruros	≤ 0,10%
Prescripciones mecánicas	
Resistencia compresión a 2 días	20,0 MPa
Resistencia compresión a 28 días	≥ 42,5 MPa
	≥ 62,5 MPa
Prescripciones físicas	
Inicio de fraguado	≥ 45 minutos
Expansión (Le Chatelier)	10 mm

Tabla 13. Características del cemento.



3.2.2 Agua.

El agua utilizada cumple con las indicaciones del artículo 27º de la EHE-08 [16].

3.2.3 Áridos naturales.

3.2.3.1 Arena.

Los áridos naturales empleados en la fabricación del HMARF fueron suministrados en big bags por Sílices La Cuesta, procedentes de su cantera situada en Cornellana, Asturias. Su origen es silíceo. Las arenas silíceas se utilizan habitualmente en la fabricación de HMARF debido a su alta resistencia. Para este estudio se han utilizado dos fracciones distintas: una arena silícea de tamaño 0,5/1,6 mm y otra más fina de tamaño 0/0,5 mm. En la **figura 39** se observan muestras de las arenas referidas.



Figura 39. Arenas silíceas.

3.2.3.2 Harina de sílice.

La harina de sílice utilizada en la fabricación del HMARF fue suministrada en sacos de 20 kg por Sílices Gilarranz S.A procedentes de su planta situada en la provincia de Segovia. Su tamaño máximo de partícula es de 40 μm . Las propiedades físicas y químicas se observan en la **tabla 14**.



Análisis químico	
SiO ₂	>99,3 %
Fe ₂ O ₃	0,05%
Al ₂ O ₃	0,26%
TiO ₂	0,05%
K ₂ O	0,04%
CaO	0,02%
Pérdida al fuego (1100°C)	0,17%
Características físicas	
Densidad Real	2,57
Densidad aparente Arena seca	0,8
Dureza (Mohs)	7
PH	7,00
Humedad en %	inf. 0,2

Tabla 14. Propiedades de la harina de sílice.

3.2.4 Áridos reciclados.

3.2.4.1 Residuos de mina de fluorita.

Se han obtenido del proceso de obtención de la fluorita (CaF₂) en las instalaciones de Mina Ana. Proceden de los cuatro centros mineros, propiedad del grupo Minersa, situados en Asturias. Los residuos utilizados proceden de la etapa final del circuito de flotación del que se obtiene el concentrado de espato de flúor, con una riqueza superior al 97% en CaF₂. Los residuos se separan del espato de flúor mediante bombeo por gravedad en las celdas de flotación (**figura 40**) y son conducidos a la planta de tratamiento de residuos. De aquí se obtienen tres tipos de residuos diferentes: finos que provienen directamente del lavadero de la mina, arena residual y finos. Los finos del lavadero se obtienen directamente de las instalaciones de bombeo antes de que las arenas residuales sean tratadas (**figura 41**). La arena residual y los finos se obtienen de la instalación de escurrido de la mina. En ella se tratan los residuos que se generan en el proceso de flotación (**figura 42**). Los finos de mina se corresponden con los finos obtenidos después de tamizar los residuos en los ciclones de escurrido y ser extraídos por la parte superior de los ciclones junto con gran parte del agua presente en el residuo (**figura 43**), mientras que la arena residual se corresponde con los gruesos que se vierten por la parte inferior de estos ciclones a los depósitos de arenas de la mina (**figura 44**). Como se muestra en la **tabla 15**, estos residuos tienen alto porcentaje de sílice (SiO₂), superior al 60%, y un porcentaje de cal comprendido entre el 10% y 16%, en función del tipo de residuo.



Figura 40. Celdas de flotación.



Instalación de bombeo y clasificación.



Finos de los lavaderos de la mina.

Figura 41. Proceso de obtención de los finos del lavadero de la mina.



Figura 42. Instalación de escurrido de residuos.



Tamiz de separación de los finos.



Finos de la mina de fluorita.

Figura 43. Proceso de obtención de los finos de la mina de fluorita.



Depósito de la arena residual de mina.



Arena residual de mina.

Figura 44. Proceso de obtención de la arena residual de mina.



Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I
Finos de mina	68,46	1,71	2,06	0,02	3,39	11,06	0,16	0,63	0,12	0,04	9,93
Arena residual	71,65	1,50	1,66	0,01	1,21	10,80	0,13	0,57	0,11	0,03	8,82
Arena de lavadero	60,58	1,56	2,19	0,02	3,34	15,64	0,17	0,56	0,10	0,04	13,80

Tabla 15. Composición química (%) de los residuos de Minersa.

3.2.4.2 Residuos de granito.

Áridos reciclados a base de residuos de granito procedentes de la cantera Rosa, propiedad de la empresa Granitos Cabaleiro, situada en O Porriño, Pontevedra (**figura 45**).



Figura 45. Cantera de granito.

Los residuos procedentes del corte del granito que se han utilizado en este estudio han sido: residuos finos de granito que se obtienen del proceso de corte de los bloques de granito (**figura 46**), una arena obtenida durante la perforación en la cantera para la extracción de los bloques de granito (**figura 47**) y, por último, residuos finos de granito con restos de granalla que se obtienen del proceso de corte de los bloques de granito por fricción entre el propio bloque y una mezcla abrasiva que se realiza en los telares o máquinas de corte (**figura 48**). Como se observa en la **tabla 16** estos residuos tienen un alto contenido de silice (SiO₂), superior al 60%, un contenido de alúmina (Al₂O₃) entre el 11% y 12% y, en el caso de los finos con restos de granalla, se observa también un alto contenido de Fe₂O₃ y de CaO en comparación con el



resto de residuos. Esto es debido a la presencia de pequeñas partículas de acero y cal apagada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que forman parte de la mezcla abrasiva utilizada durante el proceso de corte.



Proceso de corte de los bloques de granito.



Finos de granito.

Figura 46. Proceso de obtención de los finos de granito.



Extracción de los bloques de granito.



Gruesos de granito.

Figura 47. Proceso de obtención de los gruesos de granito.



Figura 48. Proceso de obtención de los finos de granito con restos de granalla.

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I
Finos de granito	67,22	11,94	1,97	0,03	0,29	0,93	3,31	4,96	0,21	0,10	1,12
Gruesos de granito	76,33	11,87	2,00	0,02	0,21	0,43	2,95	5,05	0,13	0,02	0,77
Finos con granalla	60,51	11,50	14,59	0,13	0,41	4,53	2,68	4,08	0,24	0,15	0,73

Tabla 16. Composición química (%) de los residuos de granito.

3.2.5 Humo de sílice.

El humo de sílice utilizado fue suministrado por Elkem y Basf en sacos de 25 kg y 20 kg, respectivamente (**figura 49**). Físicamente actúa para optimizar el empaquetamiento de las partículas de la mezcla obteniéndose una estructura más densa y resistente y químicamente actúa como una puzolana altamente reactiva. Además, al tratarse de un componente clave en muchos materiales de construcción, se utiliza en productos de cemento con fibras con el fin de mejorar la dispersión de los ingredientes y mejorar las propiedades y la durabilidad. Las propiedades físicas y químicas del de humo de sílice, se pueden observar en la **tabla 17** y en la **tabla 18**.



Figura 49. Humo de sílice.

Propiedad	Especificación
SiO ₂ (%)	> 90
Punto de fusión (°C)	1550-1570
Densidad aparente (kg/m ³) aprox.	500-700
Superficie específica (m ² /g):	15-30
Tamaño de partícula, media (µm):	0,15
Retención en tamiz de 45 µm (%)	< 1,5

Tabla 17. Propiedades físicas y químicas de Elkem Microsilica® 940 (D).

Propiedad	Especificación
SiO ₂ (%)	≥ 85
Densidad aparente (kg/m ³) aprox.	550-700
Superficie específica (m ² /g):	15-35
Tamaño de partícula, media (µm):	0,15
Contenido de cloruro (%)	< 0,1

Tabla 18. Propiedades físicas y químicas de Basf MasterRoc MS 610.

3.2.6 Fibra de acero.

La fibra de acero empleada en este estudio ha sido fibra WIREX 0,2/13 con una resistencia mínima a tracción de 1000N/mm². Fue suministrada por Arcelor Mittal en cajas de 20 kg (**figura 50**). Se obtuvieron a partir de alambre trefilado en frío siguiendo los procedimientos de calidad establecidos por la norma UNE-EN 14889-1 [144].



Figura 50. Fibra de acero.

3.2.7 Aditivos.

En la dosificación de los hormigones se ha utilizado como aditivo Sika ViscoCrete-225 Powder. Se trata de un superplastificante en polvo que se clasifica dentro del grupo de los polixicarboxilatos empleados en la fabricación de hormigones autocompactantes, hormigones para prefabricados y hormigones de altas prestaciones. Se eligió este aditivo por tratarse de un superplastificante diseñado para proporcionar la máxima reducción del agua, un aspecto fundamental a la hora de fabricar HMARF. Además, proporciona una fluidez excelente y favorece la autocompactación del hormigón.

En la **figura 51** se puede observar una muestra del superplastificante Viscocrete-225. El aditivo se almacenó en cubos de plástico con cierre hermético y protegido de la luz para su correcta conservación.



Figura 51. Muestra Viscocrete 225.



3.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

3.3.1 Determinación de la distribución granulométrica.

La granulometría de los diferentes áridos empleados en el estudio se ha realizado de acuerdo con las prescripciones establecidas en la norma UNE-EN 933-1 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado” [145], que nos permite determinar la curva granulométrica de los áridos dividiendo el material mediante una serie de tamices en diferentes fracciones de tamaños decrecientes. El equipo empleado para realizar los ensayos consta de una serie de tamices de ensayo con aberturas cuadradas que cumplen las especificaciones de la norma UNE- EN 933-2 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas” [146] y una tamizadora mecánica (**figura 52**).



Figura 52. Tamizadora.

Sin embargo, la distribución granulométrica de la harina de sílice, del humo de sílice, de los finos de corte de granito, de los finos de granito con restos de granalla, de los finos de mina, de la arena residual de mina y de los finos del lavadero, debido al reducido tamaño de sus partículas, se realizó mediante difracción laser. El equipo utilizado fue un analizador Beckman Coulter modelo LS 13 320 (**figura 53**).



Figura 53. Equipo de difracción laser LS 13 320.

3.3.1.1 Distribución granulométrica de los áridos naturales y residuos.

En las figuras que se muestran a continuación se pueden ver las curvas granulométricas de los diferentes materiales empleados en este trabajo. Para observar adecuadamente las curvas, debido a la diferencia de tamaño de partículas, se han separado en dos figuras. En la **figura 54**, se observa la distribución granulométrica de los gruesos de granitos (GG), y las de las arenas silíceas.

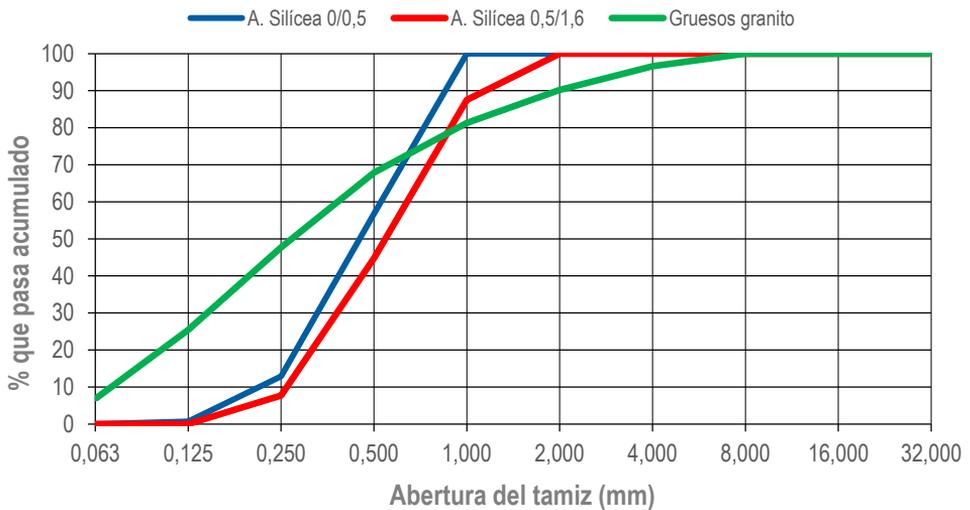


Figura 54. Curvas granulométricas arenas silíceas y gruesos de granito.



En la **figura 55** se observan las curvas granulométricas de la harina de sílice, de los finos de mina (FM), de los finos del lavadero de la mina (LM), de la arena residual de la mina 0/0,3 mm (AM), de los finos de granito (FG), de los finos de granito con restos de granalla (FGG) y de los dos tipos de humo de sílice utilizados. Las distribuciones granulométricas de los residuos de granito, se asemejan bastante a la curva de la harina de sílice. Esto unido al alto contenido de SiO_2 presente en estos residuos, superior al 60%, hace que sean una buena alternativa como sustitutos de la harina de sílice en el HMARF. En el caso de la arena residual de mina 0/0,3 mm se ha optado por utilizarla como reemplazo de la arena silíceo 0/0,5 mm.

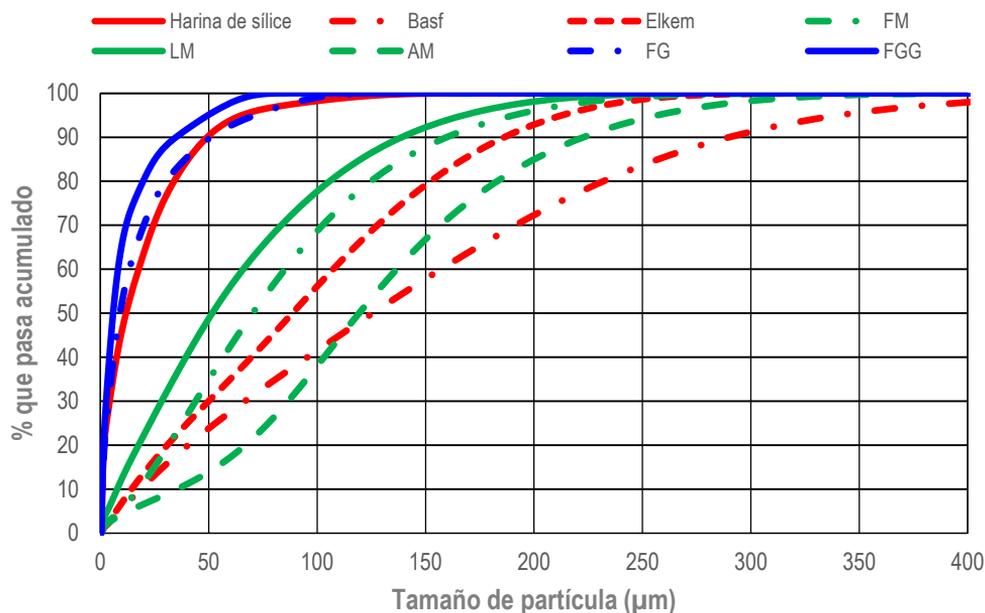


Figura 55. Curvas granulométricas de los finos.

3.3.2 Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

La densidad y la absorción de los áridos naturales y los residuos de granito más gruesos empleados en este estudio se determinaron mediante el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1097-6 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua" [147]. Las partículas se pesan secas y saturadas con superficie seca y el volumen se determina mediante las pesadas realizadas con un picnómetro utilizado para partículas de árido comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm.



La densidad de los áridos más gruesos (las arenas silíceas 0/0,5 y 0,5/1,6 y los gruesos de granito) se determinaron tomando una muestra de 1 kg del árido en cuestión. En primer lugar, se extiende la muestra en una bandeja, se cubre con agua y se deja reposar durante 24 horas. A continuación, se extiende la muestra de ensayo humedecida, en una capa uniforme sobre el fondo de una bandeja, y se expone a una corriente de aire caliente hasta conseguir las partículas de los áridos saturadas con superficie seca.

Para valorar si se ha alcanzado el estado de superficie seca se rellena con parte de la muestra un molde cónico como el de la **figura 56**. Una vez lleno se apelmaza ligeramente con 25 golpes de pisón, se retira el molde y, si el cono del árido no se desmorona, se continúa secando la muestra. Se repite el procedimiento hasta que se produzca el desmoronamiento al retirar el molde, tal y como se muestra en la **figura 57**.



Figura 56. Molde y pisón empleados.



Figura 57. Muestra arena silícea 0/0,5 mm con superficie seca.



Una vez que se tiene la muestra saturada con superficie seca, se pesan entre 600 y 700 gramos y se anota su valor (M_1). La muestra se sumerge en agua a $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$ en un picnómetro y se eliminan las burbujas de aire balanceando y dando ligeros golpes al picnómetro en posición inclinada. Una vez retiradas las burbujas se coloca el picnómetro en el baño María, tal como se muestra en la **figura 58**, y se mantiene durante $(24 \pm 0,5)$ horas a una temperatura de $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$. A continuación, se seca, se enrasa, se tapa y se pesa (M_2). Acto seguido se vacía todo su contenido sobre una bandeja y se seca en una estufa a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hasta masa constante (M_4). Por último, se limpia el picnómetro se rellena de agua, se enrasa, se tapa y se pesa (M_3). En la **figura 59** se muestra la secuencia de dicho proceso.



Figura 58. Muestras del árido al baño María.

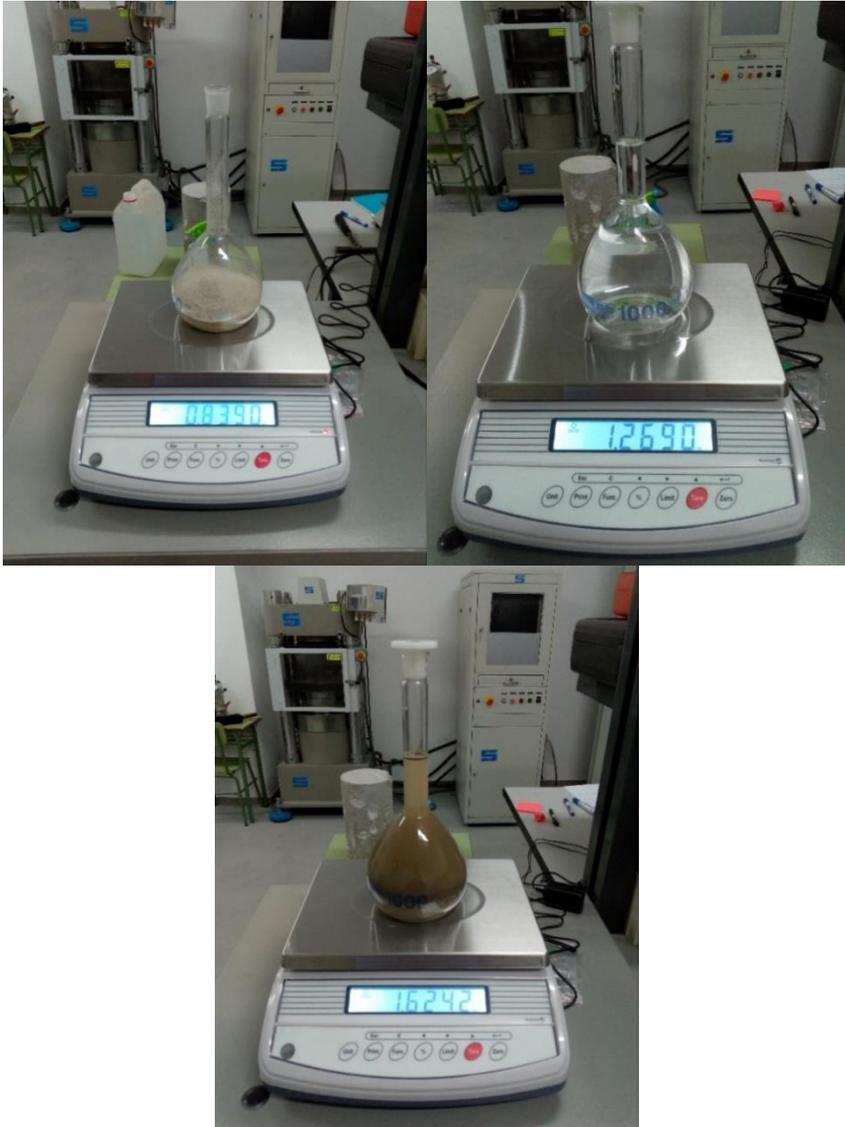


Figura 59. Determinación de la densidad de las partículas.

La densidad del árido seco se obtiene según:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

La absorción de agua (como porcentaje de la masa seca) tras inmersión durante 24 h (WA_{24}), se calcula según:



$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

donde:

M₁ es la masa del árido saturado con la superficie seca, pesada al aire, en gramos.

M₂ es la masa del picnómetro que contiene la muestra del árido saturado, en gramos.

M₃ es la masa del picnómetro relleno de agua únicamente, en gramos.

M₄ es la masa de la muestra del ensayo secada en estufa, pesada al aire, en gramos.

En la **tabla 19** se muestran los resultados de absorción de agua de las arenas silíceas y los gruesos de granito.

Material	Ref.	M ₁	M ₄	WA ₂₄ (%)
Arena silícea 0/0,5 mm	1	572,8	571,2	0,28
Arena silícea 0,5/1,6 mm	1	547,8	545,6	0,40
Arena silícea 0,5/1,6 mm	2	549,8	546,2	0,66
Gruesos de Granito	1	574,4	561,2	2,35

Tabla 19. Resultados absorción de agua.

3.3.3 Determinación de la densidad de partículas finas.

La densidad de los finos de mina, la arena residual de mina, la arena de lavadero, los finos de corte de granito y los finos con restos de granalla, se determinó mediante el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1097-7 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 7: Determinación de la densidad real del filler. Método del picnómetro" [148]. Mediante este procedimiento se nos permite determinar la densidad de las partículas más finas gracias a la sustitución de cierta cantidad de un líquido de densidad conocida por la muestra del ensayo.

La densidad real de los finos se determinó tomando una muestra de 50 g de cada material. La muestra se seca en una estufa a una temperatura de (110 ± 5) °C hasta obtener masa constante. Una vez que se tiene la muestra seca, se pesa un picnómetro limpio y seco con su tapón (m₀). A continuación, se rellena el picnómetro con 10 g de la muestra de finos y se vuelve a pesar (m₁). A continuación, se rellena de agua destilada hasta cubrir la muestra y se deja reposar. Se rellena el picnómetro con agua hasta su enrase y se pesa con la muestra del ensayo y el líquido (m₂). En la **figura 60** se muestra el equipo utilizado.



Figura 60. Equipo para determinar la densidad real de los finos.

Por último, se calibra el picnómetro determinando su volumen. Para ello se limpia, se seca y pesa junto con su tapón (m_0). A continuación, se rellena con agua destilada, se coloca el tapón y se vuelve a pesar (m_3).

Se calcula el volumen del picnómetro según:

$$V = \frac{m_3 - m_0}{\rho_w}$$

Se calcula la densidad real del filler, ρ_f , mediante:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w}}$$

donde:

V es el volumen del picnómetro, en mililitros;

m_0 es la masa del picnómetro, con su tapón, en gramos;

m_1 es la masa del picnómetro con la muestra de ensayo, en gramos;

m_2 es la masa del picnómetro conteniendo la muestra de ensayo y relleno por completo de agua, en gramos;

m_3 es la masa del picnómetro lleno de agua, en gramos;



ρ_w es la densidad del agua a una temperatura dada en el momento de m_2 , en megagramos por metro cúbico;

3.3.4 Determinación de la densidad de partículas mediante picnometría de helio.

La utilización del picnómetro de He nos permite corroborar los resultados de densidad obtenidos con anterioridad con el objetivo de minimizar los posibles errores que se hayan cometido en su determinación. Para determinar la densidad se utilizó el picnómetro de helio que se muestra en la **figura 61**. En primer lugar, se seca la muestra en una estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se coloca en un portamuestras de 1 cm^3 . Se pesa y registra en gramos el peso de la muestra, se introduce dentro de la cavidad del portamuestras y se cierra el equipo. Por último, se configuran los parámetros del análisis y comienza el ensayo. El ensayo se realiza de forma automatizada, a una temperatura de 35°C . El ensayo finaliza cuando el equipo registra cinco mediciones consecutivas dentro de los rangos de tolerancia previamente establecidos. Una vez finalizado el ensayo, el equipo genera automáticamente un informe con la densidad media de las partículas de la muestra analizada. En la **figura 62** se puede ver un esquema del funcionamiento de un picnómetro de helio.



Figura 61. Picnómetro de He modelo AccuPyc 1330.

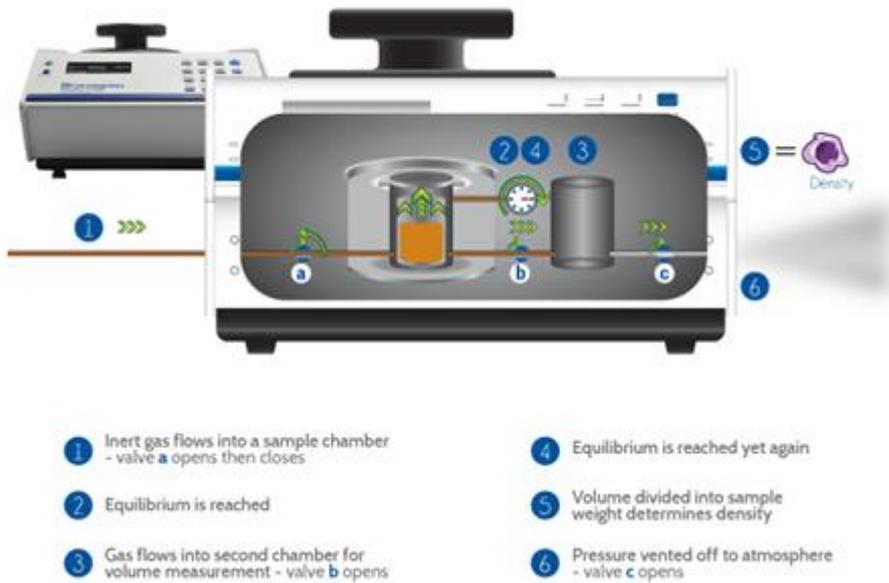


Figura 62. Funcionamiento del picnómetro de helio.

Por último, en la **tabla 20** y en la **tabla 21** se muestran las densidad media obtenida con el picnómetro de helio de los materiales y residuos utilizados en este trabajo. Estas densidades son las que se han tenido en cuenta a la hora de realizar las correspondientes sustituciones.

Material	Arena 0,5/1,6 mm	Arena 0/0,5 mm	Humo de sílice	Harina de sílice
Densidad (kg/m ³)	2616	2616	2300	2609

Tabla 20. Densidad de los materiales.

Material	Finos de mina	Finos del lavadero de la mina	Arena residual mina	Finos de granito	Finos con granalla	Gruesos de Granito
Densidad (kg/m ³)	2723	2748	2717	2633	2856	2627

Tabla 21. Densidad de los residuos.

3.3.5 Determinación de los finos en la arena.

En el caso de las arenas silíceas naturales también se evaluó la cantidad de finos según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 933-8 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena” [149]. El equipo necesario para realizar el ensayo consta de dos probetas cilíndricas graduadas provistas de tapones



de caucho y un pistón tarado para el ensayo, una regla graduada en milímetros, un tubo lavador, un embudo y una máquina de agitación (**figura 64**). Además, se necesita una solución concentrada y una solución de lavado. Ambas están compuestas de cloruro de calcio, glicerina, una solución de formaldehído y agua destilada.

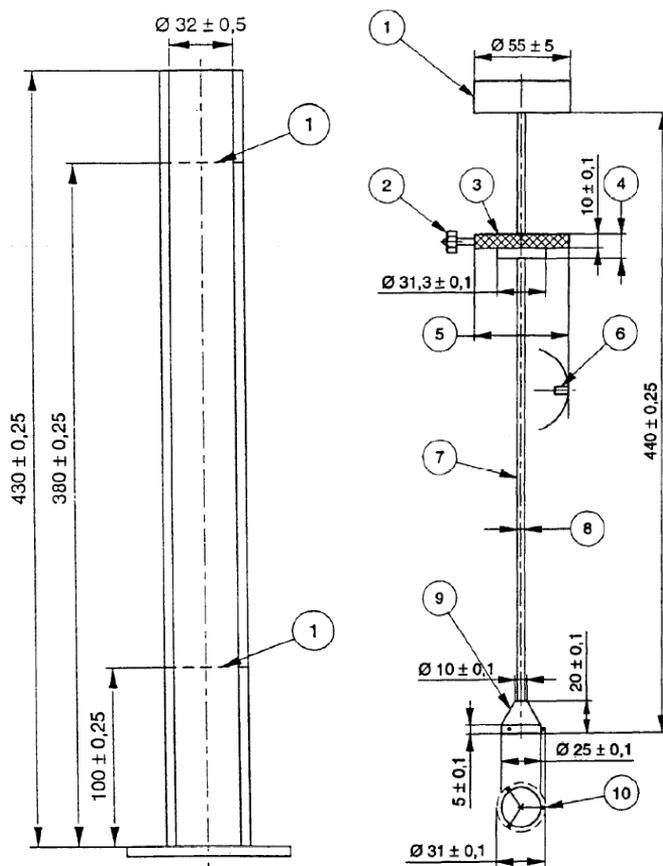


Figura 63. Probeta cilíndrica graduada y pistón.

Para determinar el equivalente de arena, en primer lugar se sifona la solución de lavado en cada probeta cilíndrica hasta la marca inferior de cada una de ellas (véase **figura 63**). Una vez sifonada la solución de lavado se vierte la muestra a ensayar en cada una de las probetas a través de un embudo, golpeando la base de las probetas con el propósito de desalojar las posibles burbujas de aire que queden y favorecer el contacto total de la solución con la muestra del árido a ensayar.



A continuación, se dejan reposar las muestras en las probetas durante 10 min. Transcurrido este tiempo se sellan las probetas con los tapones de caucho y se agitan durante (30 ± 1) s en la máquina, tal y como se muestra en la **figura 64**. Finalmente, se vuelven a colocar las probetas en posición vertical.



Figura 64. Ensayo de equivalente de arena.

A continuación, se quitan los tapones y se enjuagan con la solución lavadora, de tal forma que las partículas del árido caigan dentro de la probeta. Se introduce el tubo lavador en la probeta y se llena con la solución hasta la marca superior de la probeta (véase **figura 63**). Por último, se deja reposar cada probeta durante $(20,00 \pm 0,25)$ min y transcurrido este tiempo se mide con una regla graduada la altura h_1 del nivel superior de la suspensión en relación a la base de la probeta. Una vez determinada la altura h_1 se baja suavemente el pistón hasta que el pie repose sobre el sedimento, como se muestra en la **figura 65**, y se determina la altura h_2 , midiendo la distancia entre la cara inferior de la cabeza del pistón y la cabeza superior del disco. Las medidas de h_1 y h_2 se redondean al milímetro.

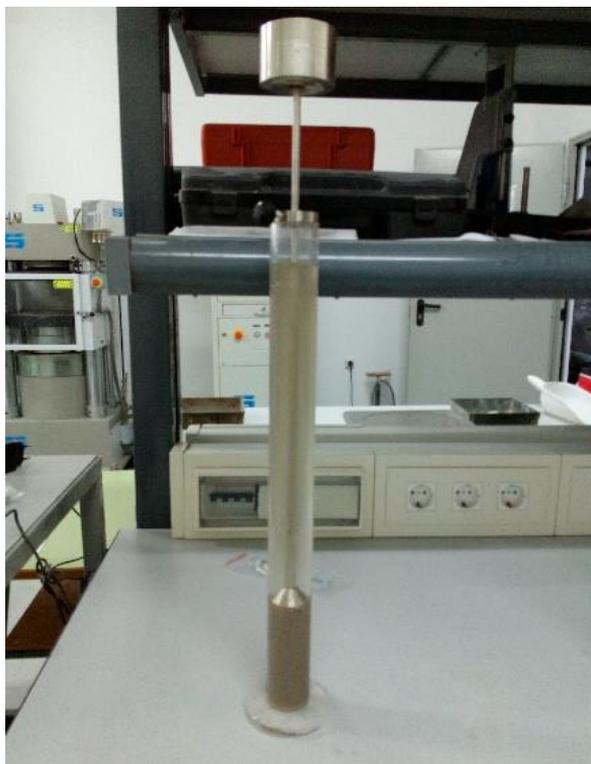


Figura 65. Procedimiento de medida del ensayo.

El equivalente de arena, SE (10), se calcula según la expresión:

$$SE(10) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

El valor se determina con una incertidumbre de medida de una cifra decimal. El equivalente de arena, SE (10), se redondea al número entero más próximo y se obtiene mediante el valor medio correspondiente a los dos ensayos realizados. En la **tabla 22** se muestran los resultados obtenidos para las dos arenas silíceas y la arena residual de la mina fluorita.

Material	SE ₁	SE ₂	SE	Tiempo
Arena Silícea 0,5/1,6 mm	96	98	97	20 min
Arena Silícea 0/0,5 mm	96	97,9	97	20 min

Tabla 22. Resultados equivalente de arena.



3.3.6 Determinación de la composición química.

La composición química de los residuos mineros (véase **tabla 3**) y siderúrgicos (véase **tabla 4**) utilizados en este trabajo se ha determinado mediante una fluorescencia de rayos X (XRF). Este tipo de análisis permite determinar la composición química de cada residuo al analizar la radiación generada por una muestra de cada uno de los residuos al ser irradiada con rayos-X.

Para realizar el análisis XRF hay que preparar una probeta con cada una de las muestras que, posteriormente, serán analizadas con el espectrómetro de rayos X. Con esta finalidad se mezclan 0,6 gramos de material con 6 gramos de tetraborato de litio. Esta sustancia permite bajar el punto de fusión de los materiales de 1400 °C a 1100 °C. Una vez obtenida la mezcla, se coloca en un equipo de fusión por inducción (**figura 66**), donde se calienta hasta alcanzar su punto de fusión. Una vez que se ha fundido, se agita, se mezcla y se homogeneiza. Cuando ya está homogeneizada se vierte sobre un crisol y se enfría mediante el sistema de ventilación presente en el equipo hasta obtener las probetas para el análisis XRF.



Figura 66. Equipo de fusión por inducción.

A continuación, se procede a realizar el análisis químico de cada muestra. Para ello, cada una de ellas se introduce en el espectrómetro PW 2404 (**figura 67**), donde se irradian con rayos X. Por último, mediante una aplicación informática específica de análisis cualitativo y cuantitativo se obtiene la composición química de las muestras analizadas.



Figura 67. Espectrómetro para fluorescencia de rayos X Philips PW 2404.

3.4 FABRICACIÓN DEL HMARF.

Una vez realizada la caracterización de los diferentes materiales que se utilizarán en la fabricación del HMARF incorporando residuos industriales y mineros, se procede a fabricar el hormigón de control y el resto de amasadas con diferentes porcentajes de sustitución de alguno de los materiales. En este estudio se ha analizado la influencia que tiene el reemplazo de la arena y de la harina de sílice, en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%, por diferentes residuos mineros e industriales. En la **tabla 23** se muestran los áridos sustituidos y los porcentajes de sustitución de cada uno de ellos.

Tipo de árido	% de sustitución parcial	% de sustitución total
Arena silícea 0/0,5 mm	35%	10%
	50%	14%
	70%	19%
	100%	28%
Arena silícea 0,5/1,6 mm	35%	18%
	50%	26%
	70%	36%
	100%	52%
Harina de sílice	35%	7%
	50%	10%
	70%	14%
	100%	21%

Tabla 23. Porcentajes de reemplazo del árido total.



3.4.1 Dosificación del HMARF.

Se ha partido de una dosificación base que asegure, en principio, la autocompactabilidad de la masa en estado fresco y, por otra parte, una resistencia a compresión por encima de 110 MPa. Para el ajuste de las de las cantidades requeridas de cada uno de los materiales en la dosificación de partida, se han realizado amasadas de prueba de 1,25 l con el fin de desperdiciar la menor cantidad de material. Para ello se ha utilizado la amasadora de mortero que se muestra en la **figura 68**. Además, dichas amasadas sirvieron para establecer de manera sistemática el proceso de fabricación. Una vez comprobados que los valores de la resistencia a compresión obtenidos estaban dentro de lo previsto se procedió al desarrollo del programa experimental. En la **tabla 24** se muestran las cantidades finales del HMARF, sin fibra, que se ha establecido como hormigón de control.



Figura 68. Amasadora de mortero para hormigones de prueba.

Material	Cemento	Arena 0/0,5 mm	Arena 0,5/1,6 mm	Harina de sílice	Humo de sílice	Agua	Aditivo
Dosificación (kg/m ³)	800	302	565	225	175	175	10

Tabla 24. Dosificación final de HMARF.



La sustitución se ha realizado reemplazando el porcentaje del árido convencional previsto por el mismo volumen de los diferentes áridos reciclados. A continuación, se indican las diferentes sustituciones que se han realizado en este estudio:

- Residuos procedentes de las minas de fluorita como reemplazo de la arena sílicea 0/0,5 mm.
- Residuos de granito como reemplazo de la arena sílicea 0,5/1,6 mm.
- Residuos finos del corte del granito como reemplazo de la harina de sílice 0/40 μm .
- Finos de las minas de fluorita como reemplazo de la harina sílice 0/40 μm .
- Finos procedentes de los lavaderos del proceso de extracción de la fluorita como reemplazo de la harina sílice 0/40 μm .
- Residuos finos de granito con restos de granalla como reemplazo de la harina sílice 0/40 μm .

En la **tabla 25** se muestra un resumen del programa de ensayos llevado a cabo en este estudio.

Material	Sustitución	Abrev	% de sustitución				% Aditivo
			35*	50	70	100	
Arena Sílicea 0/0,5 mm	Arena residual de mina 0/0,3 mm	AM	35*	50	70	100	1,00
Arena Sílicea 0,5/1,6 mm	Grueso de granito	GG	35*	50	70	100	1,00
Harina sílice 0/40 μm	Finos de mina	FM	35*	50	70	100	1,00
	Arena de lavadero de mina	LM	35*	50	70	100	1,00
	Finos de granito	FG	35*	50	70	100	1,00
	Finos de granito con granalla	FGG	35*	50	70	100	1,40-1,80**

* El humo de sílice utilizado fue de la marca Basf. Para el resto de amasadas se utilizó de la marca Elkem.

** Las cantidades de aditivo fueron del 1,50% para el 35%, del 1,40% para el 50%, del 1,60% para el 80% y del 1,80% para el 100%.

Tabla 25. Programa de ensayos.

Para las amasadas del HMARF con finos de granito con restos de granalla como sustituto de la harina de sílice hubo que aumentar la cantidad de aditivo superplastificante en relación con el resto de amasadas. Esto es debido a que este residuo, además de granalla metálica y finos de granito, contienen cierta cantidad de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que, al ser secado en la estufa, se convierte en CaO . Esto hace que un porcentaje del agua de amasado reaccione con el CaO para formar de nuevo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ generando una deshidratación en la mezcla y, por tanto, un aumento en la cantidad de agua o aditivo



demandada por el hormigón. Para ajustar estas cantidades se hicieron pruebas con la amasadora de mortero aumentando el porcentaje de aditivo hasta conseguir un HMARF con la trabajabilidad deseada.

3.4.2 Procedimiento seguido para la fabricación del HMARF reciclado.

Para el amasado se utilizó una mezcladora Betonmass, modelo ST-150CD, de eje vertical y palas giratorias, con una capacidad de 150 litros (**figura 69**).



Figura 69. Amasadora utilizada para fabricar el HMARF.

Antes de introducir los materiales en la amasadora se humedece el interior del tambor. El orden de vertido de los materiales es el siguiente:

- 1º. Arena de sílice 0,5/1,6 mm o el residuo que lo sustituya.
- 2º. Arena de sílice 0/0,5 mm o el residuo que lo sustituya.
- 3º. Harina de sílice o el residuo que lo sustituya.
- 4º. Humo de sílice.



- 5°. Cemento.
- 6°. Una vez introducidos se mezclan en seco durante 30 segundos.
- 7°. Transcurridos 30 segundos, con la amasadora en marcha, se vierte toda el agua y se continúa amasando durante otros 2 minutos.
- 8°. Cuando han transcurrido dos minutos y medio desde el comienzo del amasado se vierte el superplastificante y, por último, se añade la fibra de acero.
- 9°. Después de 25 minutos de amasado finaliza el proceso.

3.4.3 Fabricación, curado y preparación de probetas.

Se fabricaron probetas cilíndricas de 15×30 cm, probetas cúbicas de 10×10×10 cm y probetas prismáticas de 10×10×40 cm, de 40×40×160 mm y de 25×25×285 mm, según normas UNE-EN 12390-1 [150], UNE-EN 191-1 “[151] y UNE 80113 “[152]. En la **figura 70** se puede ver una serie de los diferentes moldes empleados en la fabricación de las probetas de HMARF.



Figura 70. Serie de moldes empleados para la fabricación del HMARF.

Después de llenados se desmoldaron a las 24 h y se trasladaron a la cámara húmeda donde permanecieron durante 28 días a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 95%, tal y como se especifica en la norma UNE-EN 12390-2 [106] (**figura 71**).



Figura 71. Probetas en la cámara húmeda.

La cara superior de las probetas cilíndricas se refrentaron mediante azufre líquido, tal y como se especifica en el anexo A de la norma UNE-EN 12390-3 [153]. Con el refrentado se garantiza el paralelismo entre las caras, con el fin de obtener el mejor contacto entre ellas y los platos de la prensa, así como para garantizar una distribución uniforme de tensiones durante la aplicación de la carga. En la **figura 72** se muestra el equipo empleado para el refrentado.



Figura 72. Equipo de refrentado.



3.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HMARF FRESCO.

3.5.1 Determinación de la consistencia del HMARF.

La consistencia del HMARF se determinó según el procedimiento que se describe a continuación. Es una variación del descrito en la norma NF P 18-470 [154] que, a su vez, se apoya en la norma ASTM C230 / C230M-14 [155]. Para realizar el ensayo se utilizó un molde con forma troncocónica de diámetros igual a 200 mm y 130 mm y una altura de 200 mm (**figura 73**).



Figura 73. Molde para ensayo de consistencia.

Primero se humedece el molde y se coloca invertido sobre una base horizontal no absorbente. A continuación, se llena el molde con el HMARF sin compactarlo y procurando que el hormigón no rebose. Se levanta el molde de manera uniforme y, por último, se mide el diámetro de la torta, en dos direcciones perpendiculares entre sí, con una incertidumbre de medida de un cm. Las medidas se realizaron a los 3 minutos y a los 5 minutos desde el comienzo del ensayo. Se considera que la consistencia del HMARF es la adecuada siempre y cuando el diámetro de la torta sea igual o superior a los 23 cm. En la **figura 74** se muestra el procedimiento.



Figura 74. Ensayo de consistencia del HMARF.

3.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HMARF ENDURECIDO.

3.6.1 Determinación de la densidad.

La densidad del HMARF endurecido se determinó según se establece en la norma UNE-EN 12390-7, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido” [156], sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm. Para determinar el volumen de las probetas se midió su altura sobre tres generatrices situadas a 120° cada una. La masa se calculó pesando las probetas, tras secar el exceso de agua superficial, después de estar 28 días curando en la cámara húmeda.

3.6.2 Determinación de la resistencia a compresión del HMARF.

La resistencia a compresión del HMARF se determinó según se establece en la norma UNE-EN 12390-3 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas” [153]. La prensa de ensayos utilizada es la que se muestra en la **figura 75**, con una capacidad de carga de 2500 kN.



Figura 75. Ensayo de resistencia a compresión.

Las probetas utilizadas para determinar la resistencia a compresión fueron las cúbicas de 10 cm de lado. Los ensayos se realizaron una vez seco el exceso de humedad de las probetas y en un plazo máximo inferior a las dos horas desde que se sacaron de la cámara húmeda.

La resistencia a la compresión viene dada por la siguiente expresión:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

donde:

F es la carga máxima en rotura, en N;

A_c es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, en mm²;

3.6.3 Determinación del módulo de elasticidad del HMARF.

El módulo elástico del HMARF se determinó según se establece en la norma UNE-EN 12390-13 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión” [157]. Para la realización de los ensayos se utilizó la prensa que se muestra en la **figura 76**, con una capacidad máxima de carga de 2000 kN.



Figura 76. Ensayo de módulo elástico.

Para determinar la tensión máxima a la que se someten las probetas durante el ensayo se realizan previamente ensayos de compresión, sobre tres probetas de la misma amasada. A partir de ellos se establece como tensión máxima para el ensayo, un tercio del valor medio obtenido en los mismos.

Para instrumentar las probetas se utiliza un collarín doble que se fija a la probeta y permite medir las deformaciones que experimenta, a medida que se aplica la carga, mediante la incorporación de dos LVDTs. Estos palpadores están dispuestos en dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta. Una vez centrada la probeta sobre el plato inferior comienza el ensayo. En la **figura 77** se puede ver una probeta instrumentada y lista para ensayar.

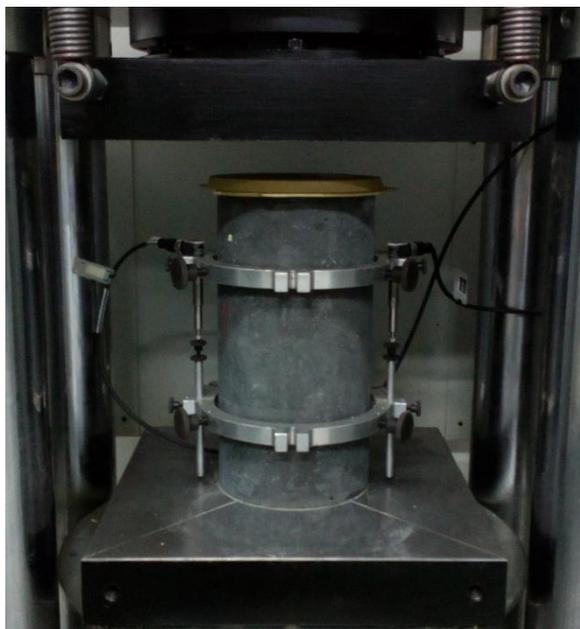


Figura 77. Probeta preparada para el ensayo de módulo de elasticidad.

La carga se aplica con una velocidad de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s hasta alcanzar la tensión máxima con un margen del $\pm 5\%$ del valor nominal. Así se mantiene durante 20 segundos. Al final de este periodo se registra la deformación de cada LVDT y se comprueba que las lecturas no difieran más del 20% respecto del valor medio. En ese caso se reduce la carga hasta el nivel inicial y se repiten dos ciclos de carga-descarga a la misma velocidad. Por el contrario, si alguno de los valores difiere más del 20% del valor medio, se para el ensayo y se vuelve a centrar la probeta.

En el tercer ciclo del ensayo se toma nota de la carga máxima y los valores de las deformaciones que se producen. La media de estas deformaciones será la deformación a carga máxima (d_s). En el proceso de descarga se toma nota de la carga inferior y de los valores de las deformaciones. La media de estas deformaciones será la deformación para la tensión inferior (d_i). En la **figura 78** se puede ver el panel de control de la prensa en este periodo de descarga.

Las deformaciones unitarias ε_s y ε_i las obtenemos dividiendo las deformaciones obtenidas en el ensayo entre la distancia existente entre los dos collarines. Al final el valor del módulo de elasticidad viene dado por la siguiente expresión:

$$E = \frac{\sigma_s - \sigma_i}{\varepsilon_s - \varepsilon_i}$$

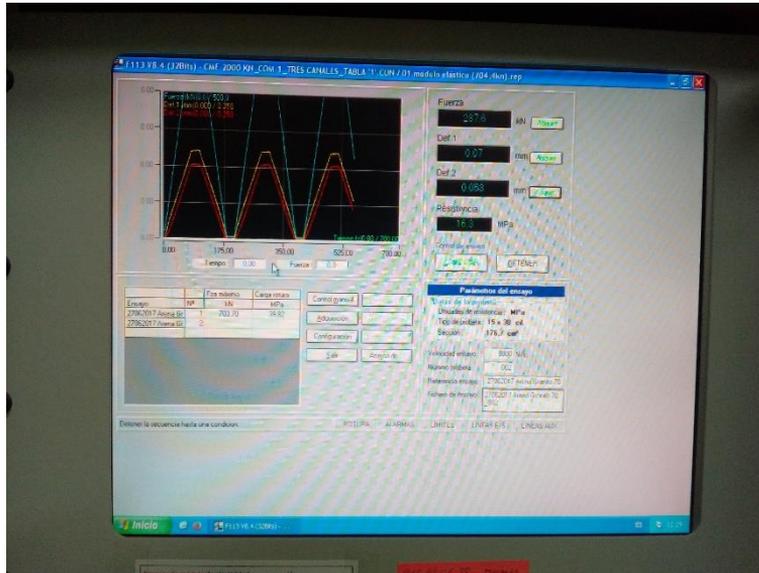


Figura 78. Panel de control.

3.6.4 Determinación de la resistencia a flexión en cuatro puntos del HMARF.

La resistencia a la flexotracción del HMARF se determinó según el procedimiento basado en el anexo D de la norma francesa NF P 18-470 [154]. Para realizar el ensayo se han utilizado probetas prismáticas 10×10×40 cm y la máquina multiensayos que se observa en la **figura 79**. Los ensayos se realizaron a los 28 días después de eliminar la humedad superficial de las probetas.



Figura 79. Maquina multiensayos.

Antes de comenzar el ensayo hay que proceder a preparar e instrumentar las probetas. En una de sus caras longitudinales se realizan dos taladros centrados a 5 cm de los extremos de la probeta. Mediante dos tornillos se fija una pletina rígida a la probeta que permite realizar medidas de la flecha sobre la misma ayudados de un LVDT y una pequeña plaquita fijada en el centro de la cara superior de la probeta. En la **figura 80** se puede ver una probeta instrumentada y lista para ensayar.



Figura 80. Probeta prismática instrumentada.

Antes de comenzar el ensayo, deben limpiarse las superficies superior e inferior de la probeta con un trapo húmedo y eliminar cualquier irregularidad de la superficie en contacto con los rodillos de aplicación de la carga. La probeta debe colocarse en la máquina de ensayo centrada y con su eje longitudinal perpendicular al eje longitudinal de los rodillos superior e inferior, tal y como puede verse en la **figura 80**.

El ensayo comienza aplicando una carga a una velocidad constante 0,10 mm/min, regulada por el sistema de control de la máquina hasta alcanzar la carga máxima. Una vez alcanzada, la velocidad se incrementa hasta los 0,20 mm/min y el ensayo no finaliza hasta que, en la rama descendente, no se haya alcanzado al menos un valor del 70% de la carga máxima.

Tras el ensayo se determina la distancia entre el punto más alto de la fisura y el centro del vano (d) (**figura 81**).

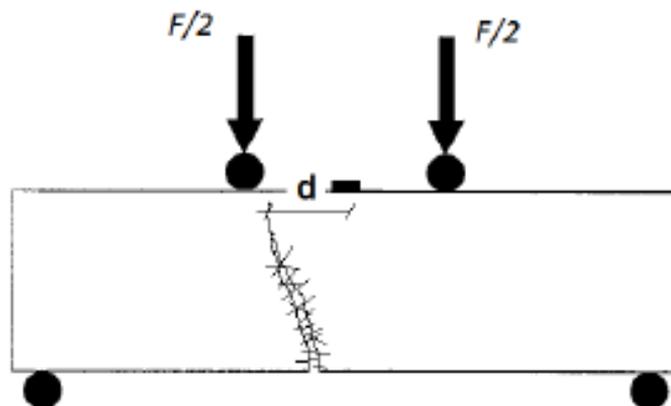


Figura 81. Medición del parámetro d .



En las seis amasadas del 35% la resistencia a flexión se ha determinado midiendo las deformaciones mediante un sistema óptico. El sistema utilizado se denomina ARAMIS. Se trata de un sistema de medición sin contacto basado en la correlación de imágenes digitales, de alta resolución, que permite medir el comportamiento de los materiales bajo la aplicación de una carga. El equipo está compuesto por dos cámaras 3D con lentes de 23 mm de distancia focal fija, un controlador del dispositivo para la adquisición de datos y software que permite la sincronización de las imágenes y los datos adquiridos por los sensores durante el ensayo (**figura 82**).



Figura 82. Sistema de medición ARAMIS.

Antes de comenzar el ensayo se calibra el equipo utilizando un panel cerámico certificado como patrón de calibración. Para ello se dispone el panel sobre una superficie plana y se dirige el sistema de cámaras hacia el mismo girándole y moviéndole según las indicaciones del software. Durante este proceso, se obtienen los parámetros necesarios para detectar y compensar las distorsiones de las lentes (radial, tangencial, etc) y se calculan las orientaciones (interna y externa) que permitirán, a posteriori, mediante una intersección directa, hacer la transformación entre las coordenadas imagen y las coordenadas objeto



para formar el modelo 3D. En la **figura 83** se observa un esquema de las coordenadas imagen y objeto. Combinando el modelo matemático del sensor con el método de correlación de imágenes digitales y un cálculo de triangulación se obtienen coordenadas 3D con una incertidumbre de medida muy reducida.

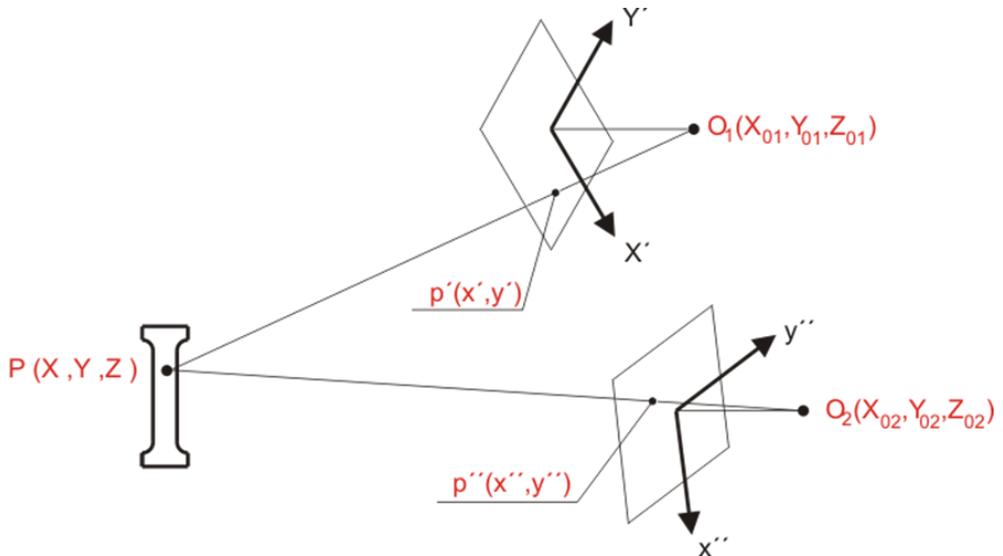


Figura 83. Esquema de coordenadas imagen y objeto.

Una vez que se ha calibrado el equipo se prepara para realizar el ensayo. En primer lugar se debe pintar de blanco mate las probetas a ensayar ya que las imágenes captadas por el sistema de cámaras 3D se realiza en escala de grises. Una vez situada la probeta centrada sobre los apoyos de la máquina de ensayo se colocan dos dianas adhesivas (**figura 84**), una en la parte inferior de la probeta, sobre el apoyo izquierdo de la máquina de ensayos (**figura 85**) y otro en la zona superior del centro de la probeta para corregir su posible traslación y giro. Como el desplazamiento Y en el apoyo es nulo, al restarlo al desplazamiento sobre el eje Y del centro del vano se consigue corregir este tipo de desplazamiento en el caso de que se produjera. La colocación de estos adhesivos también nos permite calcular la flecha máxima en el centro del vano. Por último, se establece la velocidad de captura de imágenes en una imagen por segundo.

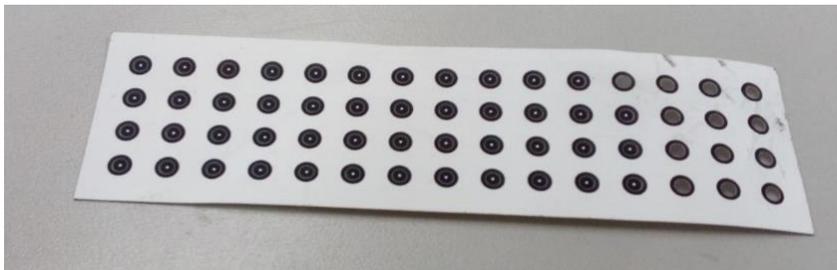


Figura 84. Pixeles adhesivos.



Figura 85. Orientación de la probeta a ensayar.

El ensayo comienza aplicando una carga a velocidad constante de 0,10 mm/min, hasta alcanzar la carga máxima. En el caso del HMARF sin fibra, el ensayo finalizaría con la rotura de la probeta, tal y como se muestra en la **figura 86**. Sin embargo, para el resto de HMARF, al incorporar fibras cortas de acero, el ensayo continúa hasta alcanzar el 70% de la carga máxima en la rama descendente. Durante el ensayo se va obteniendo la deformación que experimenta la probeta a medida que se va incrementando la carga.



Figura 86. Ensayo flexotracción con modelo ARAMIS 5M.

Una vez finalizado el ensayo, mediante el software del equipo se procede a calcular la deformación que va experimentando la probeta durante la aplicación de la carga, gracias a la sincronización de las imágenes y los datos adquiridos durante el ensayo. En la **figura 87** se puede ver la deformación que experimenta el HMARF al alcanzar la carga máxima.

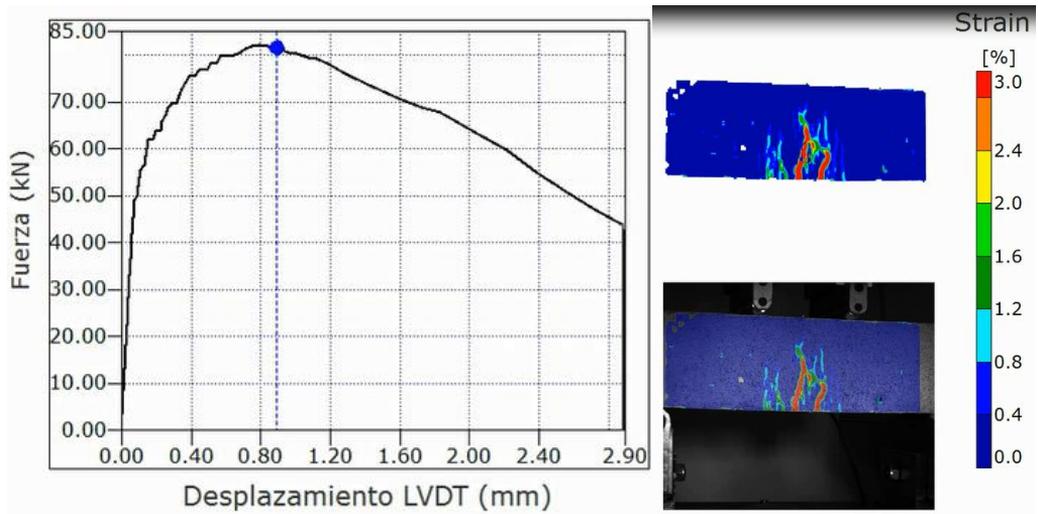


Figura 87. Deformación del HMARF.



3.6.4.1 Expresión de los resultados obtenidos del ensayo de flexotracción.

La resistencia a flexión se calcula directamente con los valores que se obtienen del ensayo de flexotracción y viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F \times L}{b \times h^2}$$

donde:

F es la fuerza total aplicada en los rodillos de carga, en N.

L es la luz del ensayo, en mm.

b es el ancho de la probeta, en mm.

h es el canto de la probeta, en mm.

3.6.5 Determinación de la resistencia a tracción del HMARF.

Una vez realizado el ensayo de resistencia a flexión se puede determinar la curva tensión-flecha y, por tanto, la resistencia a tracción del HMARF. El comportamiento a tracción se ha determinado mediante análisis inverso, utilizando la metodología propuesta por López Martínez [158]. En primer lugar, se dibuja la curva carga-flecha que se obtiene del ensayo de flexotracción y, en el caso de que la pendiente inicial de la curva carga-flecha no intersecte con el eje X en el punto 0 con un valor de δ_c , cada uno de los valores de los desplazamientos obtenidos (δ) deberán corregirse mediante la siguiente expresión:

$$\delta_{corr} = \delta - \delta_c$$

Una vez que se ha corregido la curva carga-flecha se calcula la pendiente (m) de la zona elástica de la curva, eligiendo 2 puntos del tramo lineal de la misma. A continuación, sobre la gráfica experimental se trazan dos rectas: S_{75} (recta con una pendiente igual a 0,75 que pasa por el origen) y S_{40} (recta con una pendiente igual a 0,40 que pasa por el origen). Sobre la gráfica se seleccionan también los puntos clave 1, 2, 3 y 4, que son parámetros base para la obtención del comportamiento constitutivo a tracción. En la **figura 88** se pueden observar las rectas S_{75} , S_{40} y los puntos clave.

El P_1 se define como la intersección entre la recta S_{75} y la curva carga-flecha. El P_1 queda definido por los parámetros (δ_{75} , σ_{75}).



El P₂ se define como la intersección entre la recta S₄₀ y la curva carga-flecha. El P₂ queda definido por los parámetros (δ_{40} , σ_{40}).

El P₃ se define como el punto de la rama ascendente en el que la tensión equivalente es un 97% de la tensión máxima. El P₃ queda definido por los parámetros (δ_{loc} , σ_{loc}).

El P₄ se define como el punto de la rama descendente en el que la tensión equivalente es un 80% de σ_{loc} . A este punto le corresponde un desplazamiento de valor δ_{80u} . Para tener en cuenta la posición de la fisura el valor δ_{80u} se modifica siguiendo la siguiente expresión:

$$\delta_{80u}^* = \delta_{80u} \times k1$$

$$k1 = 1 + \frac{0,6}{l} d$$

El P₄ queda definido por los parámetros (δ_{80u}^* , σ_{80u}).

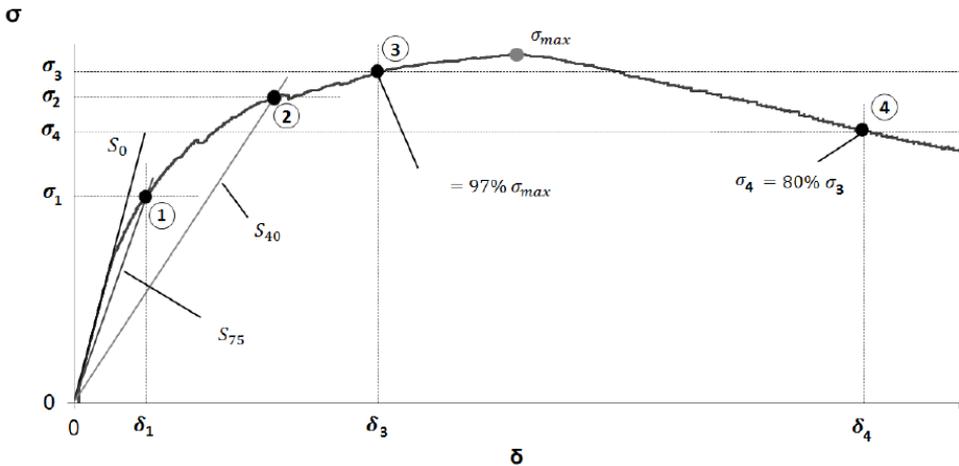


Figura 88. Curva carga-flecha ensayo flexotracción y puntos clave [158].

Una vez han quedado definidos los puntos clave de la curva carga-flecha se procede a la determinación del modelo de comportamiento a tracción del HMARF. Queda definido por una rama tensión-deformación bilineal ascendente y una rama tensión-abertura de fisura descendente. Los parámetros que lo definen y su forma se representan en la **figura 89**.

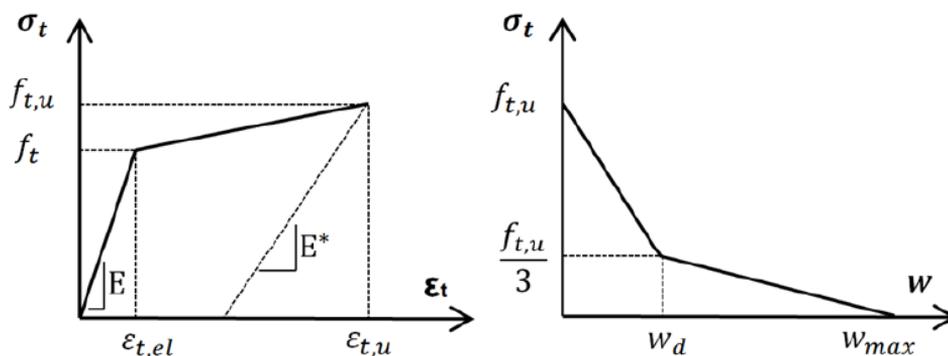


Figura 89. Ley constitutiva a tracción del HMARF [158].

Los parámetros definidos en la **figura 89** se obtendrán de acuerdo a la formulación de la **tabla 26**.

E	$2,40 h m$
f_t	$\frac{\sigma_{75}}{1,63} \left(\frac{\sigma_{75}}{\sigma_{40}} \right)^{0,19}$
$\varepsilon_{t,u}$	$\frac{f_t}{E} \left(7,65 \frac{\delta_{loc}}{\delta_{75}} - 10,53 \right)$
$\varepsilon_{t,el}$	f_t/E
α	$\varepsilon_{t,u}/\varepsilon_{t,el}$
$f_{t,u}$	$\alpha^{-0,18} \left(2,46 \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{75}} - 1,76 \right) f_t$
γ	$f_{t,u}/f_t$
$\varepsilon_{t,d}$	$\gamma^{-0,37} \alpha^{0,88} \left(3,00 \frac{\delta_{80u^*}}{\delta_{loc}} - 1,80 \right) \frac{f_t}{E}$
E^*	$0,19 E$
w_d	$\left(\varepsilon_{t,d} - \varepsilon_{t,u} + \frac{2f_{t,u}}{3E^*} \right)$
w_{max}	$l_{fibra}/2$

Tabla 26. Determinación de los parámetros constitutivos a tracción.



La nomenclatura empleada ha sido la siguiente:

- Módulo elástico (E).
- Resistencia a la fisuración de la matriz reforzada con fibras (f_t).
- Resistencia última a tracción del HMARF ($f_{t,u}$).
- Deformación al pico ($\epsilon_{t,u}$).
- Abertura de fisura a un tercio de la carga máxima (w_d).
- Abertura de fisura a tensión cero (w_{max}).

3.6.6 Determinación de la retracción del HMARF.

La determinación de la retracción del HMARF se ha realizado según las especificaciones de la norma UNE 80-112 [159] lo que permite medir, en función del tiempo, la variación de longitud de probetas. Para este ensayo se han utilizado dos probetas prismáticas de dimensiones 25×25×285 mm para cada amasada, como las que se observan en la **figura 90** y un bastidor con un reloj comparador como el de la **figura 91**.



Figura 90. Probetas empleadas para determinar la retracción.

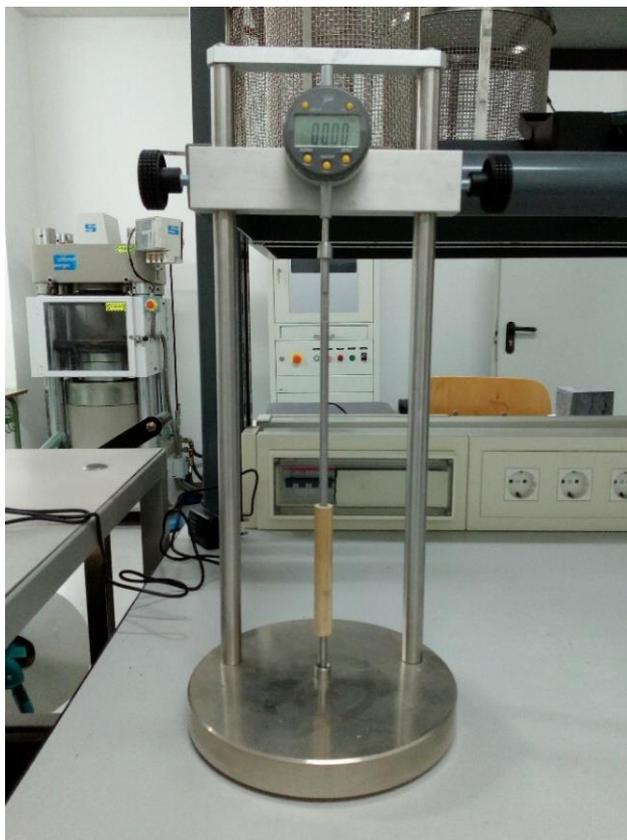


Figura 91. Reloj comparador.

Los ensayos se han realizado a 1, 4, 7, 28, 56, 90 y 180 días, después del periodo de curado normalizado de 28 días. Para realizar la medida del día 1, se calibra el reloj comparador con una varilla de control metálica de 285 mm de longitud. A continuación, se mide la probeta y se anota esta medida como valor de referencia (L_1). En días sucesivos se continúa midiendo la longitud de las probetas (L_2). La retracción es la diferencia entre el valor inicial (L_1) y las mediciones en días sucesivos (L_2).

3.6.7 Determinación de la absorción de agua del HMARF.

La absorción de agua del HMARF endurecido se determinaron basándose en el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1936 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total" [160]. El equipo necesario para realizar el ensayo consta de una campana de vacío, un compresor, un recipiente en altura con agua destilada y una válvula de tres vías (figura 92).



Figura 92. Equipo para determinar la absorción y porosidad abierta del HMARF.

Para realizar el ensayo se emplearon cubos de dimensiones 50 mm de lado para cada amasada que se obtuvieron de las probetas prismáticas empleadas en los ensayos de flexotracción. En primer lugar, se secan las probetas en una estufa a $(70 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hasta masa constante (m_d). Una vez que las probetas están secas se introducen en una campana de vacío y se disminuye la presión hasta una presión de $(2 \pm 0,7)$ kPa, tal y como se muestra en la **figura 93**. Una vez que se ha alcanzado esta presión se mantiene durante $(2 \pm 0,2)$ h con el fin de eliminar el aire presente en los poros de las probetas. A continuación, se introduce agua desmineralizada en la campana de vacío hasta cubrir las probetas y se mantienen durante 1,5 horas a la presión de $(2 \pm 0,7)$ kPa. Transcurrido este tiempo, se restablece la presión atmosférica y se dejan las probetas bajo el agua durante (24 ± 2) horas. Por último, y para cada una de las probetas, se pesa y anota el peso de la probeta bajo el agua mediante una balanza hidrostática (m_h) e inmediatamente se seca con trapo húmedo y se determina el peso de la probeta saturada (m_s).

La absorción de agua (en porcentaje de la masa seca) tras inmersión durante 24 h (WA_{24}), se obtiene según:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (m_s - m_d)}{m_d}$$

donde:

m_d es la masa de la probeta secada en estufa, pesada al aire, en gramos.

m_s es la masa de la probeta saturada con la superficie seca, pesada al aire, en gramos.



Figura 93. Probetas en campana de vacío.



CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN.

A continuación, se procede a analizar los resultados experimentales obtenidos en todas las amasadas realizadas de HMARF. En su mayoría, los resultados a analizar se representan en forma de gráfico y el análisis se basa, principalmente, en evaluar la mayor o menor influencia que tiene sobre las propiedades del HMARF el empleo de los diferentes tipos de residuo (residuos de fluorita y residuos de granito) como reemplazo, parcial o total, de los áridos naturales. Los resultados obtenidos en el programa experimental se han analizado teniendo en cuenta el tipo de residuo, el árido que se reemplazó y el porcentaje de reemplazo. Los resultados correspondientes a todos los ensayos están recogidos en el **anejo 1** del presente trabajo.

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.2.1 Análisis de los resultados obtenidos sobre la consistencia del HMARF fresco.

En las figuras que se muestran a continuación se recogen los resultados de consistencia del HMARF en estado fresco, que se tomaron una vez se terminó el proceso de amasado.

En la **figura 94** se observa como la sustitución de la harina de sílice por residuos de finos de granito (FG) produce un incremento en los valores medios de la consistencia del HMARF. También se observa que la docilidad aumenta a medida que se incrementa la cantidad de FG, alcanzando los mayores valores



para sustituciones del 50% y del 70%. Cuando la sustitución es del 100% el valor de la consistencia es igual a la del hormigón de control.

La mejora en la trabajabilidad de las amasadas con FG respecto al HMARF de control puede ser debida a la menor superficie específica de las partículas de granito respecto a las de sílice. Esto origina que el agua demandada sea menor y, al ser fija la cantidad de agua de amasado, el agua efectiva es mayor. De esta manera se consigue un aumento en la trabajabilidad.

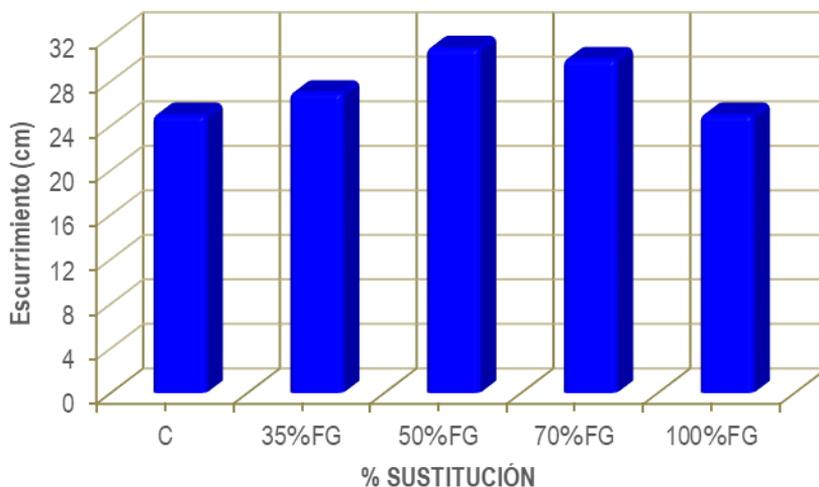


Figura 94. Consistencia del HMARF con FG.

En la **figura 95**, correspondiente a las amasadas donde se ha sustituido la harina de sílice por residuos de finos de granito con restos de granalla (FGG), se aprecia un descenso de la trabajabilidad del HMARF respecto al hormigón de referencia. Se puede ver que, a medida que aumenta la cantidad de FGG, los valores del escurrimiento obtenidos se ven reducidos. Por tanto, la trabajabilidad del HMARF se ve reducida a medida que aumenta la cantidad de FGG. Esto puede ser debido a que la presencia de un floculante en este residuo produce un aumento en la demanda de agua por parte de las partículas de FGG y, por tanto, la cantidad de agua efectiva en la mezcla es menor.

Otro factor que puede influir en esta pérdida de consistencia es un ligero aumento en la cantidad de finos de los residuos de granito con granalla respecto a la harina de sílice, como se puede ver en las curvas granulométricas, lo que produce una mayor demanda de agua. También puede influir la presencia de pequeñas partículas de acero de este tipo de residuo[161].

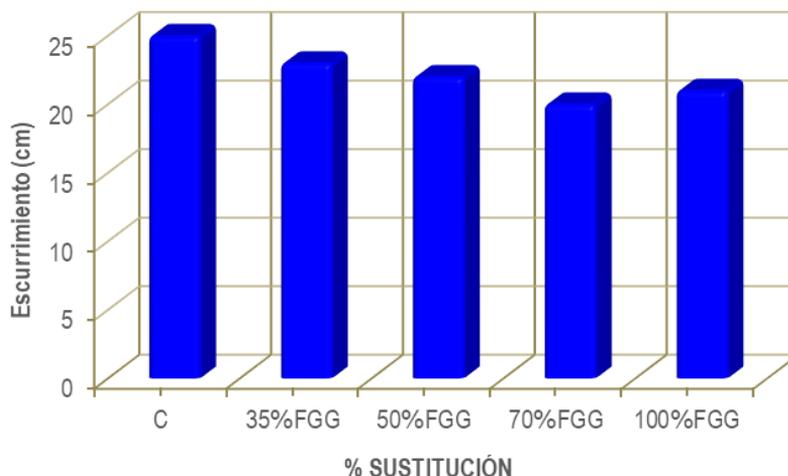


Figura 95. Consistencia del HMARF con FGG.

En la **figura 96** se aprecia un incremento del valor la consistencia del HMARF correspondiente a las amasadas con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por residuos gruesos de granito (GG). Este aumento en la trabajabilidad puede atribuirse al mayor tamaño máximo de partícula de los GG. Otra posible causa puede ser la presencia de una mayor cantidad de finos, respecto a la arena 0,5/1,6 mm, lo que favorece la lubricación de la mezcla, mejorando así su trabajabilidad. Los resultados obtenidos muestran que el tamaño de partícula y la cantidad de finos tienen una mayor influencia sobre la trabajabilidad del HMARF con GG respecto a la mayor absorción de agua de las partículas de GG.

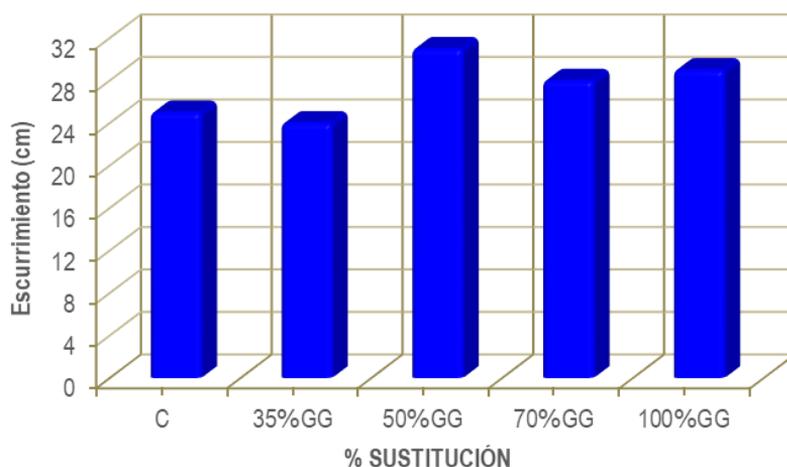


Figura 96. Consistencia del HMARF con GG.

En la **figura 97** se observa la consistencia del HMARF correspondiente a las amasadas donde se sustituyó la harina de sílice por finos procedentes de las minas de fluorita (FM). Al sustituir el 50%, el 70%



y el 100% de la harina de sílice por FM se incrementa la trabajabilidad del hormigón. Este aumento puede ser debido al mayor tamaño de las partículas de FM respecto a las partículas de la harina de sílice. Por lo tanto, el agua absorbida por los FM será menor, aumentando el agua efectiva en la mezcla y la trabajabilidad del HMARF.

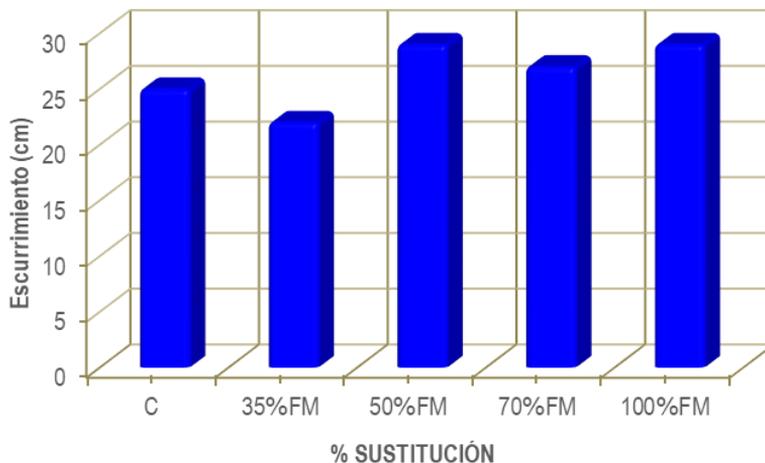


Figura 97. Consistencia del HMARF con FM.

En la **figura 98**, correspondiente a las amasadas con sustitución de la harina de sílice por finos obtenidos de los lavaderos de la mina de fluorita (LM), se puede observar una mejora de la trabajabilidad del HMARF para todos los niveles de reemplazo. Además, para una sustitución igual o superior al 50% apenas se produce variación en los valores medios. Esta mejora, al igual que sucede con los FM, puede ser debido al mayor tamaño de partícula de los LM.

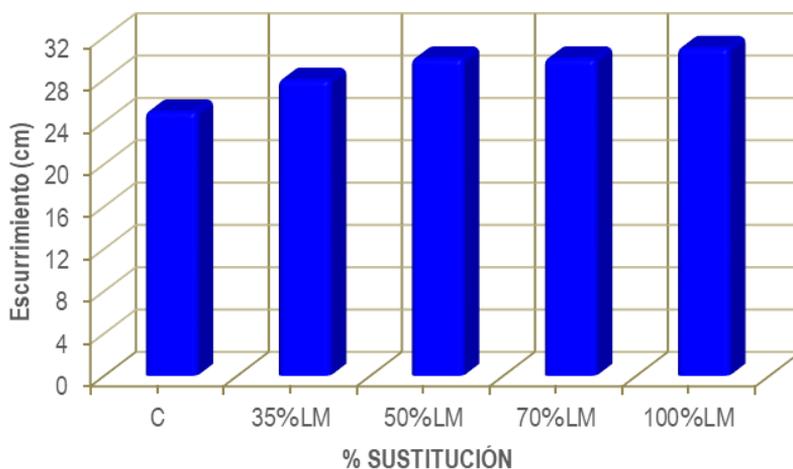


Figura 98. Consistencia del HMARF con LM.



En la **figura 99** se muestra la consistencia del HMARF correspondiente a las amasadas realizadas sustituyendo la arena 0/0,5 mm por la arena residual procedente de las minas de fluorita 0/0,3 mm (AM). Al igual que sucede con el resto de amasadas que utilizan residuos procedentes de la mina de fluorita, se observa un aumento de la trabajabilidad del HMARF. En este caso, esta mejora puede ser debida a una variación en la granulometría que pasa de ser de 0/0,5 mm, en la arena sílicea, a 0/0,3 mm, en el caso de la AM. Los resultados obtenidos son muy similares para los niveles de sustitución del 50%, del 70% y del 100%. Sin embargo, para el HMARF con un 35% de AM se observa un descenso muy pronunciado en el escurrimiento, posiblemente debido a una falta de agua o aditivo superplastificante, al empleo de humo de sílice densificado con una granulometría distinta y/o al empleo de una amasadora de mayor capacidad.

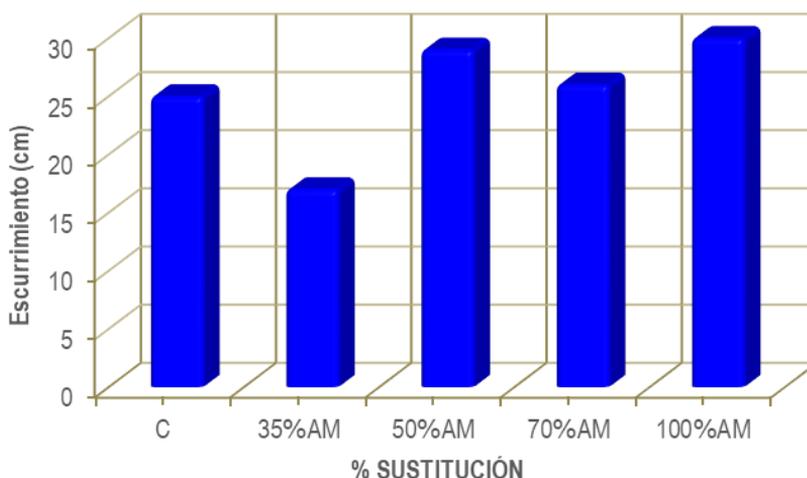


Figura 99. Consistencia del HMARF con AM.

En la **figura 100** se resumen los valores de los ensayos de consistencia del HMARF, con los diferentes niveles de sustitución de la harina de sílice por los diferentes tipos de residuos utilizados en el estudio. En el caso de los residuos procedentes de la cantera de granito (FG, FGG) se observa que la trabajabilidad es mayor cuando se emplea FG en vez de FGG. Esta reducción de la trabajabilidad puede estar influenciada por la presencia de partículas metálicas y la presencia de floculante en los FGG lo que produce una mayor demanda de agua y, por tanto, una reducción del agua efectiva. En el caso de los residuos procedentes de la mina de fluorita los valores en la consistencia son ligeramente superiores para las amasadas con LM en vez de FM. Esta mejora puede ser debida a la mayor cantidad de finos en la arena LM favoreciendo la lubricación de la mezcla y aumentando la trabajabilidad del HMARF. Para un nivel de sustitución del 35% se aprecia una mayor diferencia, respecto al resto de niveles. Esto puede ser como consecuencia de haber tenido que utilizar un 20% más de aditivo para el 35% LM. Si comparamos



los valores de los escurrimientos obtenidos para los hormigones con residuos procedentes de las minas de fluorita (FM y LM) con el de los hormigones con FG comprobamos que para un nivel de sustitución del 50% y del 70% las diferencias son despreciables. Sin embargo, para una sustitución del 100% se puede ver que los valores del escurrimiento son mayores para los finos de las minas de fluorita. Estos resultados difieren de los obtenidos para el resto de niveles de reemplazo y pueden ser por un exceso de finos en la mezcla con el 100% de FG lo que genera una mayor demanda de agua de amasado.

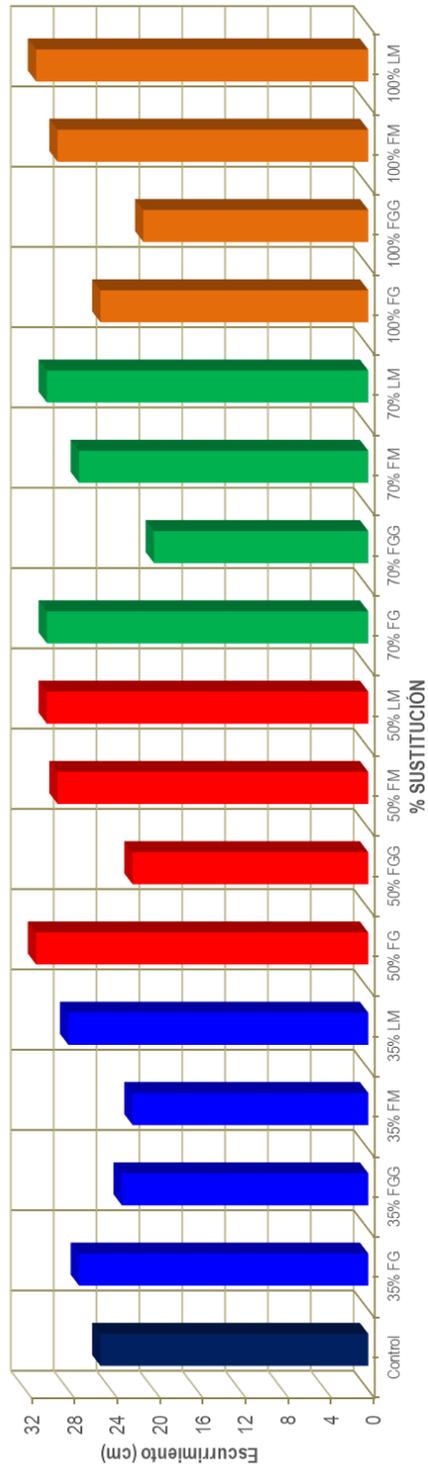


Figura 100. Consistencia del HMARF con sustitución de la harina de sílice.



En la **figura 101** se compara la consistencia del HMARF con sustitución de alguna de las dos fracciones de la arena sílicea. Los residuos procedentes de la cantera de granito (GG) sustituyen a la arena 0,5/1,6 mm, mientras que la arena 0/0,5 mm ha sido reemplazada por la arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). Se observa que, salvo para el 35%, los valores de la consistencia son superiores que en el HMARF de control. La pérdida de consistencia que se aprecia para una sustitución del 35%, respecto al HMARF de control, puede ser debida a que en estas amasadas se utilizó una amasadora de mayor capacidad y el humo de sílice densificado empleado tiene una distribución granulométrica diferente, lo que reduce la cantidad de finos de la mezcla y por tanto su trabajabilidad. Para los HMARF con AM, su mayor escurrimiento puede estar ocasionado por una variación en su granulometría pasando de 0/0,5 mm en la arena sílicea a 0/0,3 mm. En el caso de los HMARF con GG esta mejora en la trabajabilidad puede ser debida al mayor tamaño de partícula respecto a la arena 0,5/1,6 mm, aumentando la cantidad de agua efectiva presente en la mezcla y, por tanto, la trabajabilidad.

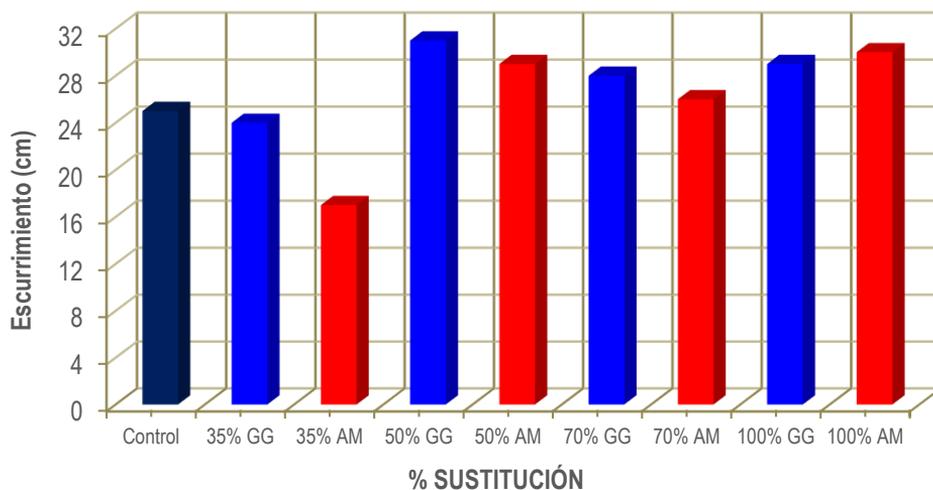


Figura 101. Consistencia del HMARF con sustitución de la arena sílicea.

En resumen, la utilización de cualquiera de los seis tipos residuos utilizados, como reemplazo parcial o total de alguno de los áridos naturales, influye sobre la trabajabilidad del HMARF, en mayor o menor medida.



4.2.2 Análisis de la densidad del HMARF endurecido.

El análisis se ha realizado con los resultados medios obtenidos de los ensayos de densidad del HMARF endurecido que se realizaron en cada una de las amasadas realizadas.

En la **figura 102** se observa la densidad del HMARF endurecido correspondiente a las amasadas con sustitución de la harina de sílice por FG. En primer lugar, y aunque se observa una ligera reducción de la densidad del HMARF, las variaciones están dentro de los márgenes de error del propio ensayo. Por otro lado, a medida que aumenta el porcentaje de finos de granito, la densidad del HMARF se va incrementando. Esto puede ser debido a la menor superficie específica de los finos de granito, aumentando el agua efectiva, el escurrimiento, la compacidad y, por tanto, la densidad del HMARF a medida que aumenta el porcentaje de FG. Sin embargo, este aumento de densidad es irrelevante ya que la variación que se produce entre el 35% y el 100% es inferior al 1,5%. Por tanto, se puede decir que para los HMARF con FG la variabilidad de los resultados prevalece sobre la posible influencia de este residuo sobre la densidad del HMARF.

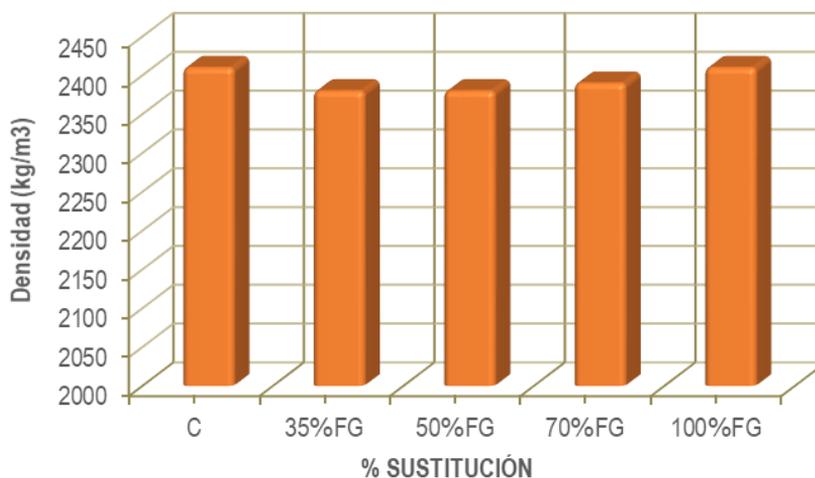


Figura 102. Densidad media del HMARF con FG.

En la **figura 103** se puede ver cómo la densidad del HMARF endurecido aumenta a medida que se incrementa la cantidad de FGG, como sustitutos de la harina de sílice. La mayor variación se produce para una sustitución del 100%. Aunque esta variación es inferior al 4%, respecto al HMARF de control, no es debida a la variabilidad de los resultados de los ensayos sino a la presencia en este tipo de residuo de partículas metálicas que aumentan su densidad y la del HMARF a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo.

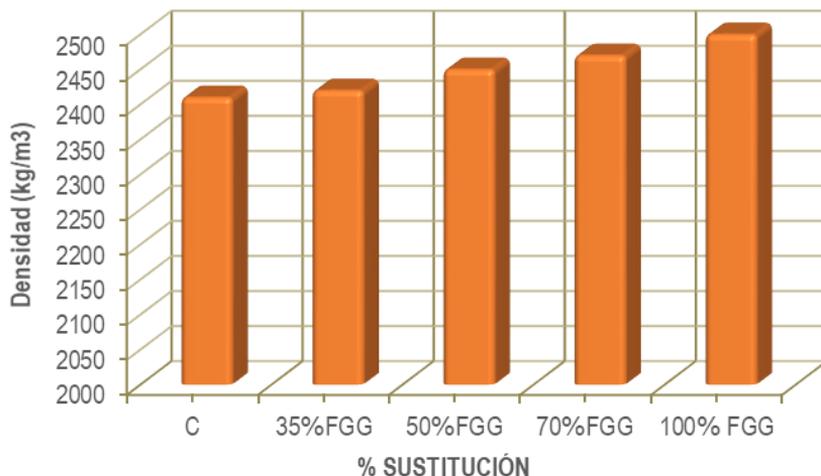


Figura 103. Densidad media del HMARF con FGG.

En la **figura 104**, correspondiente a las amasadas con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por GG, se puede observar una menor densidad del HMARF endurecido para todos los niveles de reemplazo. Este descenso en la densidad del HMARF puede ser debido a la distinta distribución granulométrica de la arena silíceo respecto a la arena de granito con mayor presencia de gruesos y más huecos entre partículas. Sin embargo, la influencia de este tipo de residuo sobre la densidad no es importante ya que la variación en todos los niveles es inferior al 3% respecto al HMARF de control.

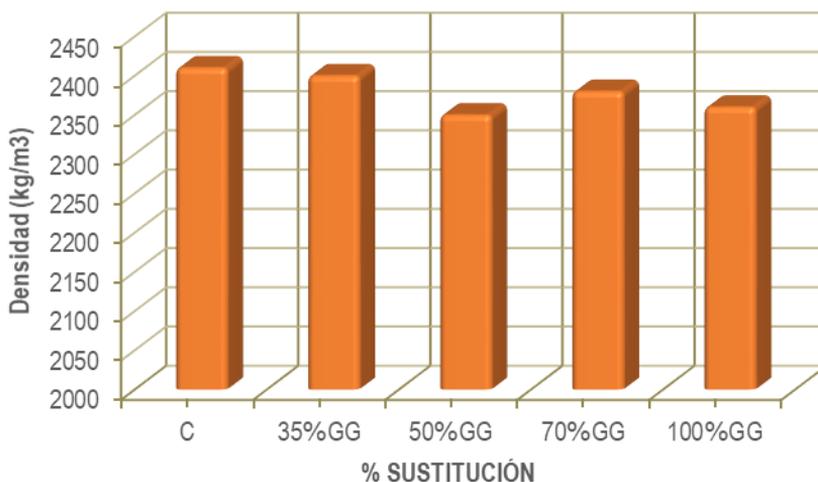


Figura 104. Densidad media del HMARF con GG.

En la **figura 105** se observa como al emplear finos de mina (FM), como reemplazo de la harina de sílice, la densidad del HMARF endurecido se reduce. Esto puede ser debido a un mayor tamaño de



partícula y una menor cantidad de finos por parte de los FM lo que produce un menor empaquetamiento y, por tanto, menor densidad del HMARF. Además, se puede ver que el porcentaje de sustitución no influye sobre la densidad del HMARF ya que los valores obtenidos para todos los niveles de reemplazo son muy similares entre sí y las variaciones que se producen están dentro de los márgenes de error del ensayo. La variación que se produce respecto al HMARF de control es muy pequeña (inferior al 3%).

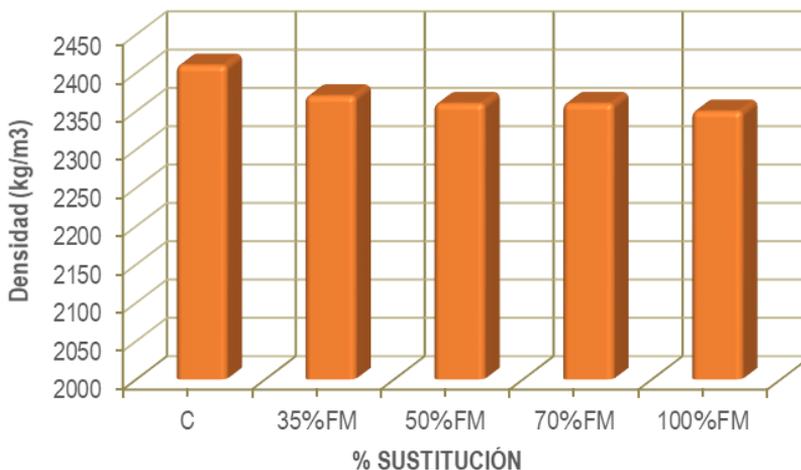


Figura 105. Densidad media del HMARF con FM.

En la **figura 106** se puede ver como al emplear finos obtenidos de los lavaderos de las minas de fluorita (LM), como reemplazo de la harina de sílice, producen un descenso en la densidad del HMARF endurecido. Al igual que para los FM, se observa una reducción en la densidad del HMARF endurecido cuando se le incorpora LM consecuencia de un mayor tamaño de partícula y una menor cantidad de finos en el residuo LM. Sin embargo, este descenso de densidad no es importante ya que la variación que se produce entre el HMARF de control y el 100% de LM es inferior al 4%. Por último, no se aprecia una influencia del nivel de reemplazo sobre la densidad del HMARF con LM ya que las variaciones que se producen son muy pequeñas, inferiores al 1,5%. Estas variaciones posiblemente son debidas a la variabilidad de los resultados obtenidos.

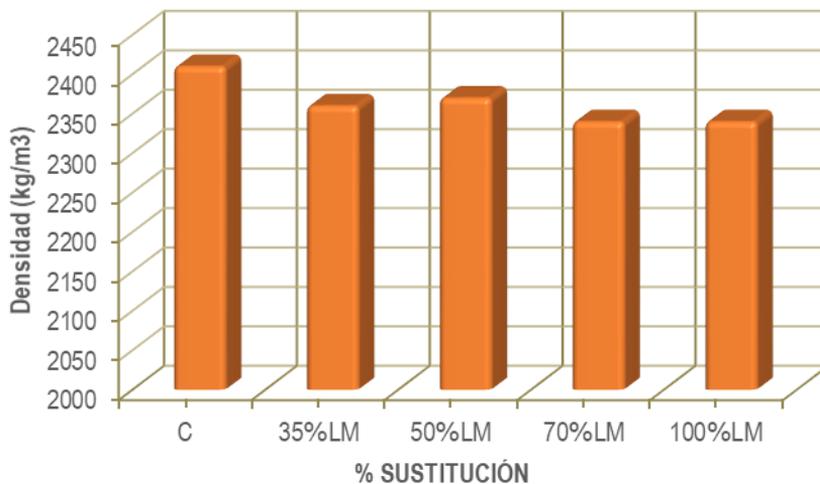


Figura 106. Densidad media del HMARF con LM.

En la **figura 107** se observa como la sustitución de la arena 0/0,5 mm por AM tiene poca influencia sobre la densidad del HMARF endurecido. La variación para una sustitución del 100% es inferior al 2,5%.

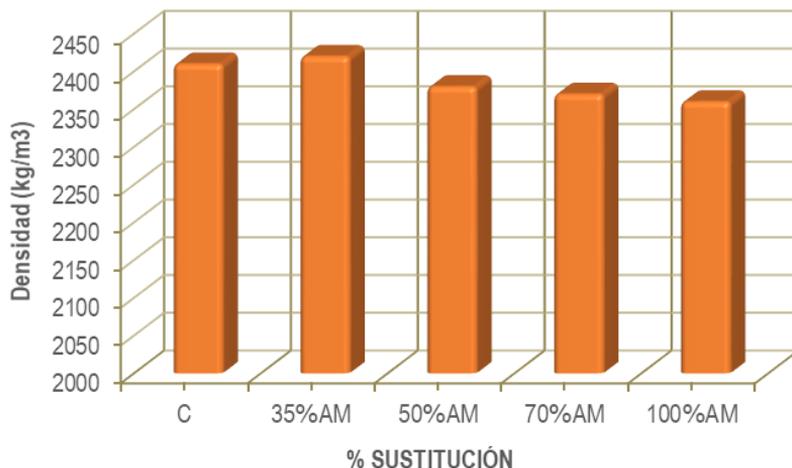


Figura 107. Densidad media del HMARF con AM.

En la **figura 108** se observa la densidad media del HMARF correspondiente a todas las amasadas con sustitución de la harina de sílice en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%, por finos de granito (FG), finos de granito con granalla (FGG), finos de mina (FM) o finos de los lavaderos de mina (LM). Se puede ver que salvo para los FGG el tipo de residuo y el porcentaje de densidad apenas tienen influencia en la densidad del HMARF. Las variaciones que se producen respecto al HMARF de control son inferiores al 3%.



En el caso de los HMARF que se fabricaron con los residuos de la mina de fluorita (FM y LM) los valores obtenidos son prácticamente iguales. Esto es debido a que en ambos casos sus curvas granulométricas y su densidad son muy similares. En el caso de los residuos procedentes de la cantera de granito (FG y FGG) y, a pesar de que sus curvas granulométricas son prácticamente iguales, se puede ver que las diferencias entre los valores medios de la densidad aumentan a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Esto posiblemente sea debido a la mayor densidad de partícula de los FGG. No obstante, las variaciones son muy pequeñas, inferiores al 4% para un reemplazo del 100%. Otro factor que puede influir en los valores más altos obtenidos para los HMARF con FGG puede ser que se ha utilizado un mayor porcentaje de aditivo superplastificante respecto al resto de residuos, favoreciendo su compacidad y, por tanto, un aumento de la densidad.

En cuanto a la diferencia de densidad existente entre las amasadas en las que se utilizaron residuos de granito respecto a las que incorporan residuos de mina puede estar ocasionada debido a que los residuos procedentes de la cantera de granito tienen un menor tamaño de partículas lo que puede dar lugar a una mayor compacidad del hormigón. No obstante, las diferencias no son muy significativas (<7%).

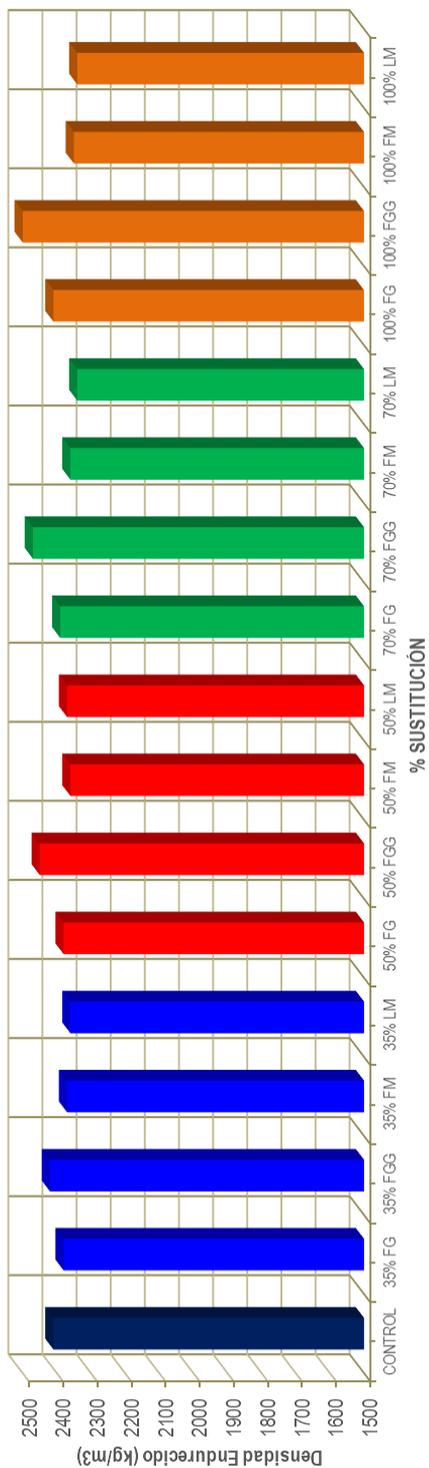


Figura 108. Densidad media del HMARF con sustitución de la harina de sílice.



En la **figura 109** se observa la densidad media del HMARF con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por gruesos de granito (GG) o la arena 0/0,5 mm por arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). Los resultados muestran una mayor densidad para el HMARF con AM, respecto a los GG, cuando el nivel de sustitución es del 35% o del 50%. Esto puede ser consecuencia de la mayor densidad de la arena residual de mina, $2,72 \text{ kg/m}^3$, respecto a los gruesos de granito, $2,63 \text{ kg/m}^3$, a pesar de que la cantidad de la arena gruesa sea aproximadamente el 50% del total de los áridos del hormigón. No obstante, se puede ver que las diferencias son muy pequeñas (<3%). Sin embargo, cuando el nivel de sustitución de las arenas silíceas es del 70% o del 100%, las densidades medias obtenidas para HMARF con AM y GG son prácticamente iguales. La variación respecto al hormigón de control es inferior al 3% para cualquiera de los HMARF con sustitución de las arenas silíceas por lo que se puede concluir que tanto el residuo como el porcentaje de sustitución no influyen sobre la densidad media del HMARF endurecido.

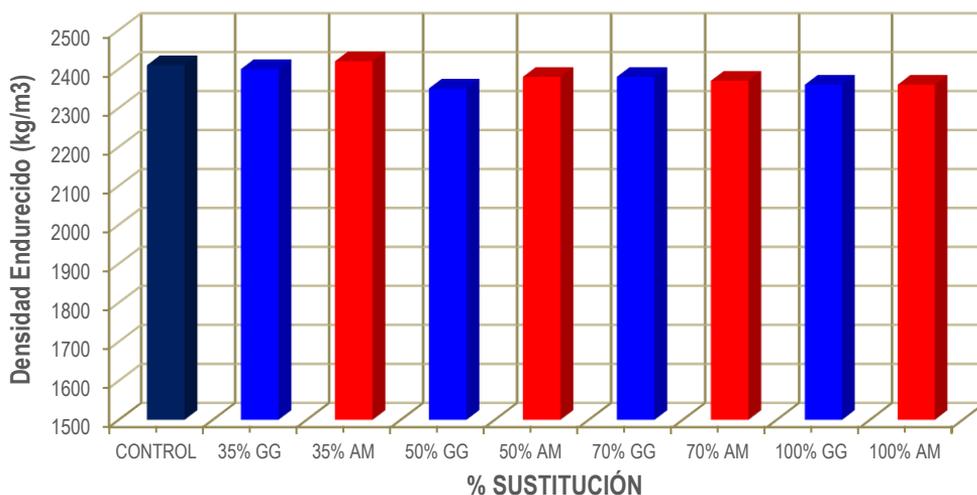


Figura 109. Densidad media del HMARF con sustitución de la arena silícea.

Por norma general y, a la vista de los resultados obtenidos, se aprecia que para el mismo porcentaje de sustitución la densidad de lo HMARF con los residuos procedentes de las minas de fluorita es más baja que para las amasadas donde se ha utilizado alguno de los residuos de la cantera de granito, posiblemente debido al mayor tamaño de partícula de los residuos de mina. No obstante y salvo para los HMARF con FGG, se puede ver que la densidad media del HMARF endurecido no se ve influenciada ni por el tipo de residuo ni el porcentaje de sustitución.



4.2.3 Análisis de la absorción de agua del HMARF endurecido.

El análisis se ha realizado con los resultados medios obtenidos de la absorción de agua para las diferentes amasadas realizadas. Para ello, se emplearon probetas cúbicas de 50 mm de lado.

En la **figura 110** se observa la influencia sobre la absorción del HMARF cuando se utilizan FG como reemplazo de la harina de sílice. Los valores obtenidos son muy bajos. La mayor absorción es del 0,39% para una sustitución del 50%. En cualquier caso, la variabilidad de los resultados está por encima de la influencia de la variable, es decir, la incorporación de este tipo de residuos no afecta sensiblemente a la absorción del HMARF.

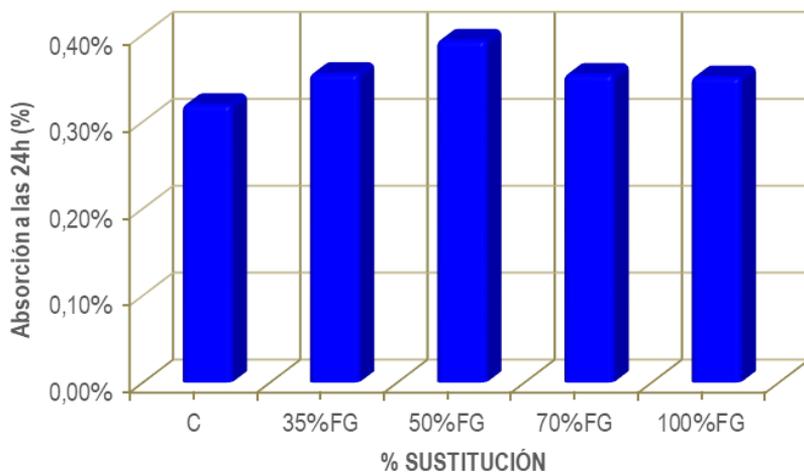


Figura 110. Absorción de agua del HMARF con FG.

En la **figura 111** se observa que la utilización de FGG como reemplazo de la harina de sílice no influye sobre la absorción del HMARF. Los valores obtenidos son muy bajos y prácticamente iguales al del hormigón de control por tanto, se puede decir que los FGG no influyen sobre la absorción.

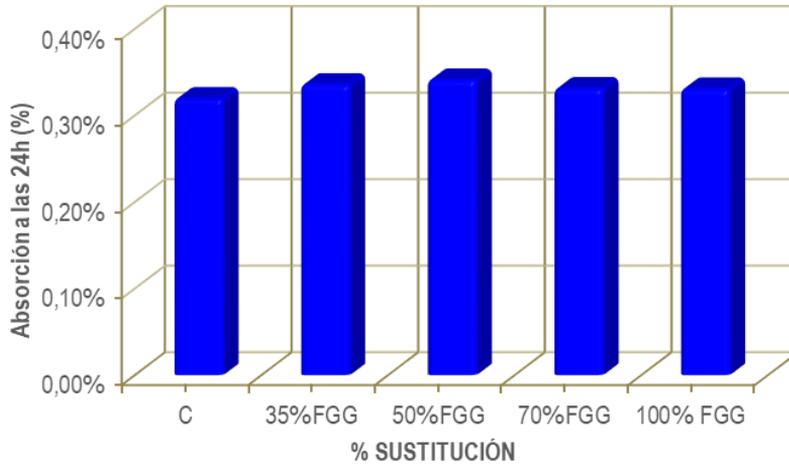


Figura 111. Absorción de agua del HMARF con FGG.

En la **figura 112** se muestra la influencia de utilizar GG, como reemplazo de la arena 0,5/1,6 mm, sobre la absorción del HMARF. En primer lugar se aprecia gran variabilidad en los resultados obtenidos para los diferentes porcentajes de sustitución, aunque los valores de la absorción siguen siendo muy bajos independientemente del porcentaje de sustitución. La mayor absorción es del 0,52% para una sustitución del 100%. De nuevo se observa que la sustitución de la arena por estos residuos apenas repercute sobre la absorción del hormigón.

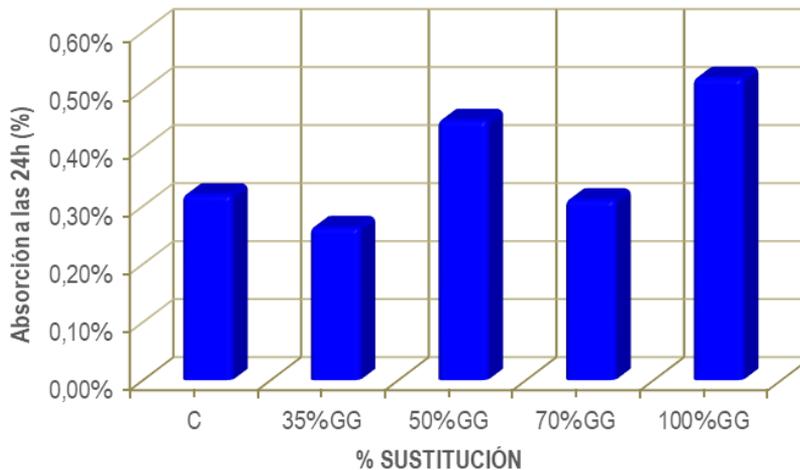


Figura 112. Absorción de agua del HMARF con GG.

En la **figura 113** se observa la influencia que tiene sobre la absorción del HMARF la utilización de los FM como reemplazo de la harina de sílice, sobre la absorción del HMARF. Aunque se aprecia un



aumento en la absorción, los valores obtenidos siguen siendo muy bajos, inferiores al 0,50%. En cuanto al porcentaje de sustitución, la variabilidad de los resultados obtenidos es mayor que la influencia de la variable.

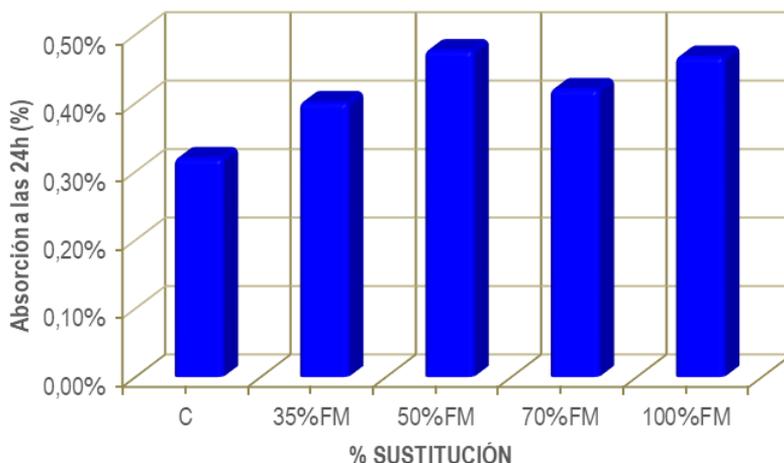


Figura 113. Absorción de agua del HMARF con FM.

En la **figura 114** se observa que la utilización de la arena LM como sustituta de la harina de sílice no influye de manera significativa sobre la absorción del HMARF. Aunque se aprecia gran variabilidad en los resultados obtenidos para los diferentes porcentajes de sustitución, los valores de la absorción siguen siendo muy bajos. La mayor absorción es de 0,60% para una sustitución del 70%. No obstante, se vuelve a ver que la variabilidad en los resultados obtenidos está por encima de la influencia de las variables analizadas.

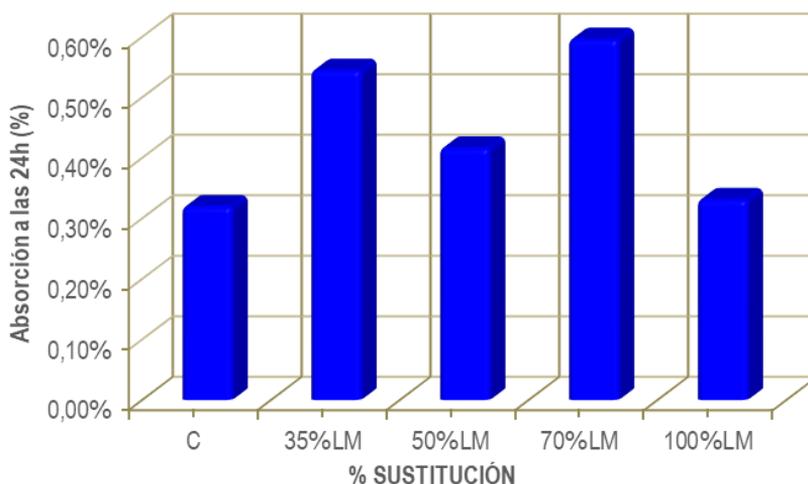


Figura 114. Absorción de agua del HMARF con LM.



En la **figura 115** se aprecia la influencia que tiene sustituir la arena 0/0,5 mm por AM sobre la absorción del HMARF. Aunque se observa una disminución en la absorción a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución, estas variaciones son muy pequeñas y, teniendo en cuenta el número de ensayos, la variabilidad de los resultados obtenidos para cada serie está por encima de la influencia las variables analizadas.

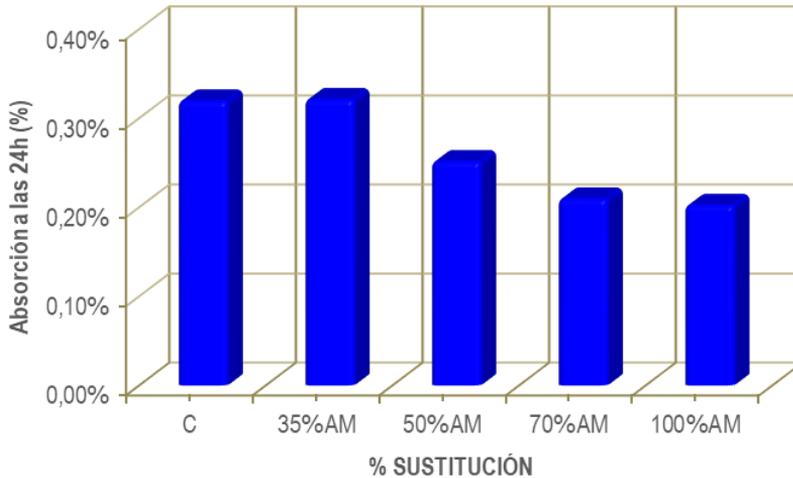


Figura 115. Absorción de agua del HMARF con AM.

En la **figura 116** se muestra la absorción de agua media del HMARF correspondientes a todas las amasadas con sustitución de la harina de sílice, en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%, por finos de granito (FG), finos de granito con granalla (FGG), finos de mina (FM) o finos de los lavaderos de mina (LM). Los resultados obtenidos muestran una mayor absorción de agua por parte de los HMARF con residuos industriales, además de una gran variabilidad para los diferentes niveles de sustitución. No obstante, los valores obtenidos son muy bajos, en ningún caso se supera el 0,60%. Por lo que se puede decir que la utilización de estos residuos no influye significativamente sobre la absorción. Por otro lado, e independientemente de la variabilidad en los resultados obtenidos, se aprecia una mayor absorción por parte de los HMARF con residuos procedentes de la mina de fluorita (FM y LM). Por tanto, se puede decir que el tipo de residuo tiene una ligera influencia sobre el porcentaje de absorción.

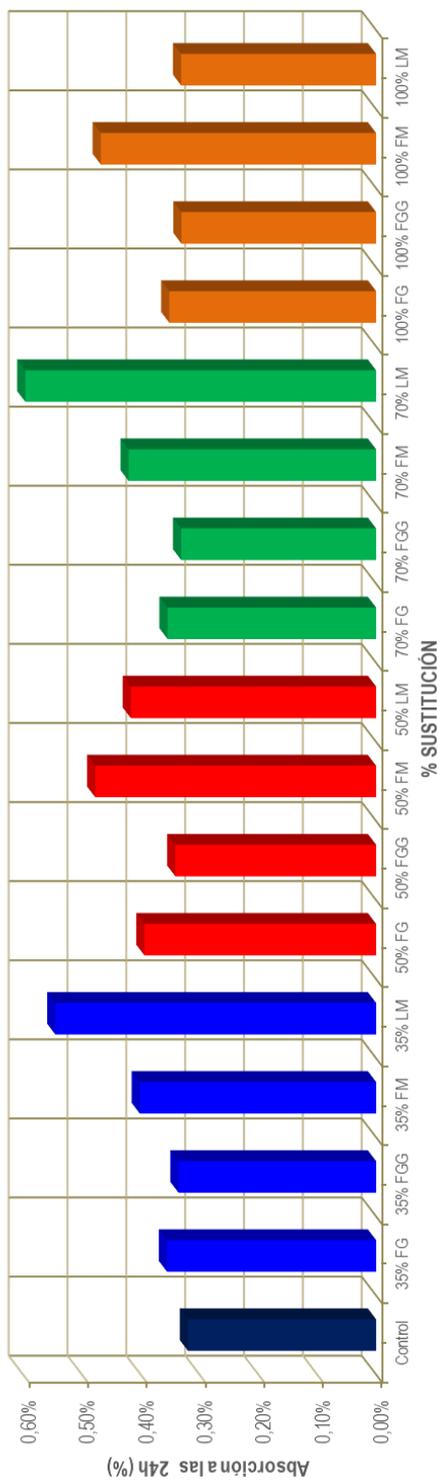


Figura 116. Absorción de agua del HMARF con sustitución de la harina de silíce.



En la **figura 117** se muestra la absorción de agua media del HMARF con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por gruesos de granito (GG) o la arena 0/0,5 mm por la arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). Como sucede para los HMARF con sustitución de la harina de sílice, se puede ver una alta variabilidad en los resultados obtenidos. No obstante, los valores obtenidos son muy bajos, inferiores al 0,55%. En cuanto al tipo de residuo se aprecia una menor absorción por parte de los HMARF con AM. Esta menor absorción puede ser consecuencia del menor tamaño de partícula y a un mayor porcentaje de finos presente en la arena AM, lo que reduce la cantidad de huecos y, por tanto, la absorción de agua.

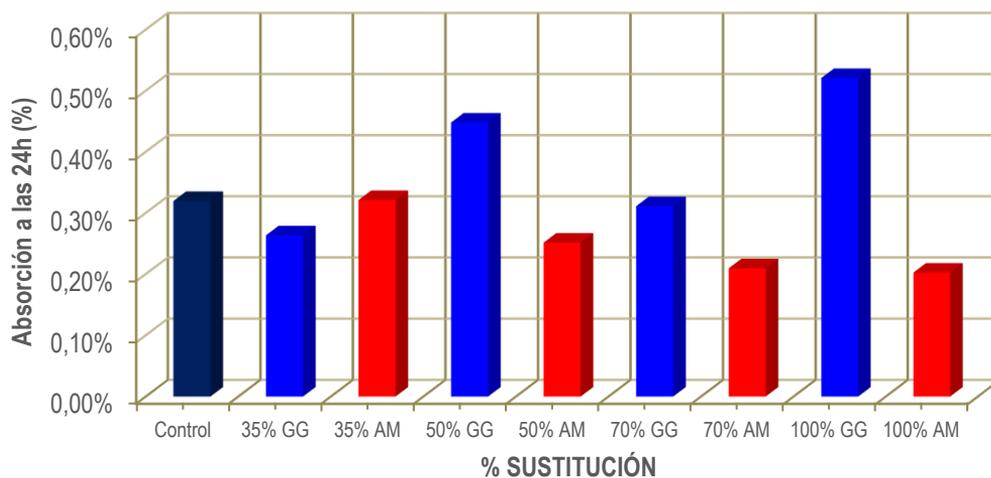


Figura 117. Absorción de agua del HMARF con sustitución de la arena silíceas.

A la vista de los resultados obtenidos para los diferentes residuos y niveles de sustitución, y a pesar de la alta variabilidad en los resultados obtenidos, la utilización de estos residuos no repercute sobre la baja permeabilidad del HMARF, una característica de este tipo de hormigones. El porcentaje de absorción en ningún caso está por encima del 0,60% del peso de la muestra seca. Los factores que más repercusión tienen sobre la absorción de agua son la procedencia del residuo y la cantidad de finos presentes en ellos. En cuanto al porcentaje de sustitución se puede decir que no influye sobre la absorción del HMARF, ya que teniendo en cuenta el reducido número de ensayos, la variabilidad en los resultados obtenidos para cada serie está por encima de la variable analizada. Este aumento en la absorción de agua y, por tanto, en la permeabilidad del HMARF con residuos respecto al hormigón de control está en la línea de los resultados obtenidos por Zegardlo [19], Pyo [22] y Soliman [72].



4.2.4 Análisis de la resistencia compresión.

El análisis se ha realizado con los resultados medios obtenidos de los ensayos que se realizaron para obtener la resistencia a compresión en cada una de las amasadas realizadas.

Como se puede ver en la **figura 118**, el empleo de FG, como reemplazo de la harina de sílice produce un aumento de la resistencia a compresión media del HMARF. Este incremento oscila entre el 4,5% y el 12%, obteniéndose el mayor valor para una sustitución del 50% y el menor para el 100%. Este aumento en la resistencia a compresión, puede ser debida a una mayor compacidad del hormigón a causa de su mayor fluidez respecto al HMARF de control ya que la dureza de la harina silíceas y los finos es similar y la distribución granulométrica de ambos es prácticamente la misma. Para una sustitución de hasta el 70% se puede decir que el porcentaje de FG no influye sobre la resistencia a compresión, ya que las variaciones que se producen son muy pequeñas y están dentro de los márgenes de error. La pérdida de resistencia para el 100%, en relación con el resto de porcentaje, puede ser consecuencia de una disminución del efecto empaquetamiento y a un aumento en la relación agua efectiva-cemento.

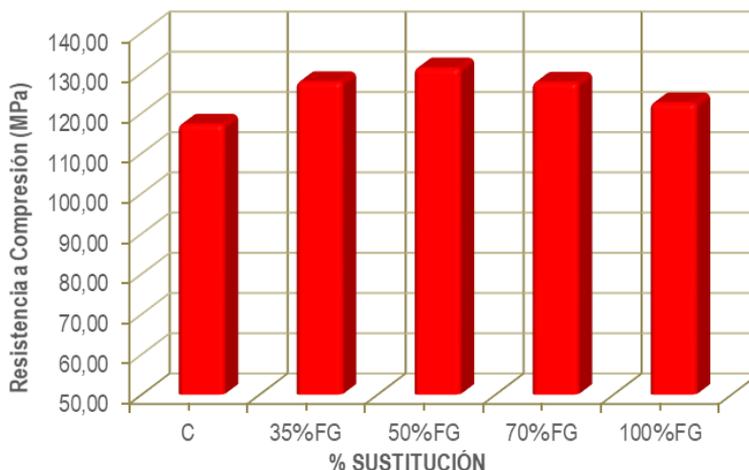


Figura 118. Resistencia a compresión del HMARF con FG.

En la **figura 119** se aprecia la influencia que tiene la utilización de FGG, como sustitutos de la harina de sílice, sobre la resistencia a compresión del HMARF. Se observa un incremento de la resistencia a compresión para todos los niveles de sustitución y oscila entre el 8,5% para el 35% de FGG y 14%, para el 70% de FGG. Este incremento de la resistencia a compresión del HMARF puede ser debido a la alta resistencia del granito y a la mayor densidad del HMARF con FGG (**figura 103**), lo que aumenta la compacidad del hormigón y, por tanto, su resistencia. No se aprecia una influencia del nivel de sustitución



ya que las variaciones para los diferentes porcentajes son muy pequeñas posiblemente consecuencia de la variabilidad en los resultados obtenidos para cada porcentaje.

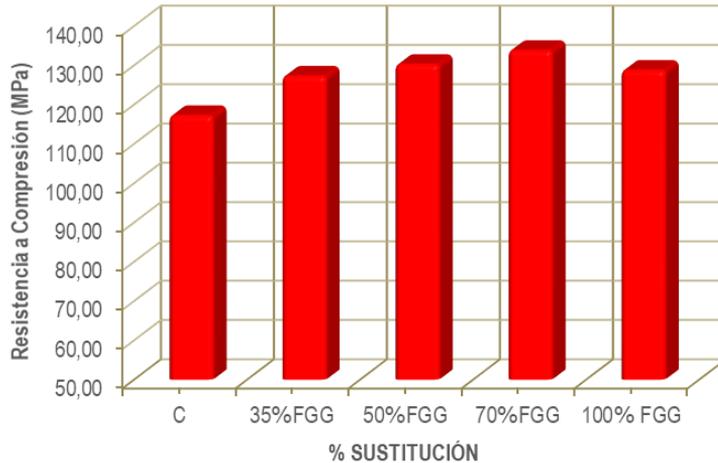


Figura 119. Resistencia a compresión del HMARF con FGG.

En la **figura 120** se muestra la resistencia a compresión del HMARF correspondiente a las amasadas con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por GG. Se puede ver que la utilización de este tipo de residuo como reemplazo de la arena silícea más gruesa produce un aumento de la resistencia que varía entre el 8% y el 20%. La mayor resistencia del granito respecto al árido silíceo puede ser una de las causas. Otra posible razón, es la formación de una matriz más compacta y densa gracias a la mayor cantidad de finos presentes en los gruesos de granito, con los que se rellenan más los huecos presentes en el hormigón. También puede influir que el tamaño máximo de árido es algo inferior en el caso de los gruesos de granito.

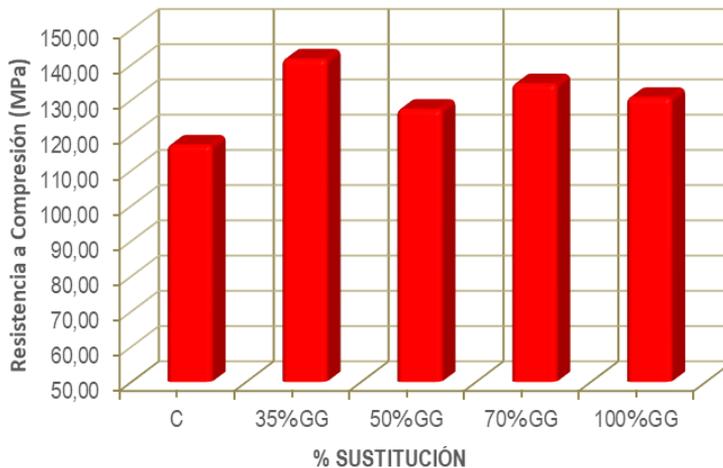


Figura 120. Resistencia a compresión del HMARF con GG.



En la **figura 121** se observa como la adicción de FM procedentes del proceso de extracción de la fluorita como reemplazo de la harina se sílice, repercute sobre la resistencia a compresión del HMARF. Los resultados muestran que la variación del valor medio de la resistencia a compresión ha sido muy pequeña respecto al hormigón de control. Para niveles de sustitución del 35%, del 50% y del 70% se observa un ligero incremento de la resistencia media a compresión, mientras que para sustituciones del 100% se produce un ligero descenso. Por tanto, se puede decir y excepto para el 100%, la resistencia a compresión se ve influenciada por la adicción de FM pero no por el porcentaje de sustitución. La pérdida de resistencia para el 100%, puede ser debida al peor empaquetamiento de la estructura granular debido a una reducción en la cantidad de finos.

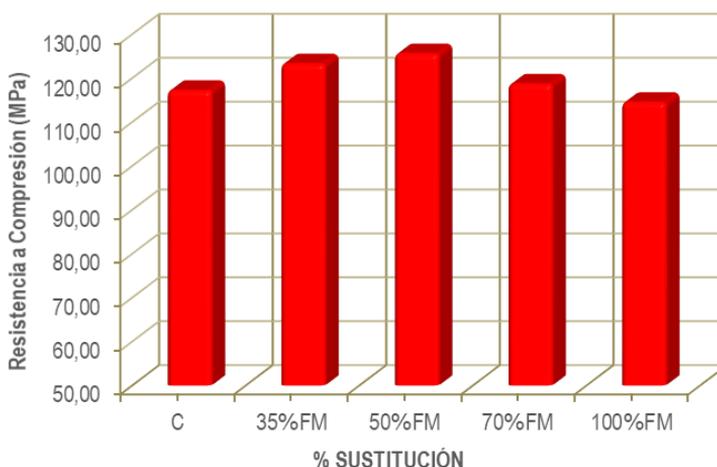


Figura 121. Resistencia a compresión del HMARF con FM.

En la **figura 122** se muestra la evolución de la resistencia a compresión del HMARF al utilizar arena LM procedente del lavadero de las minas de fluorita como reemplazo de la harina se sílice. Los resultados muestran un aumento de resistencia cuando el porcentaje de sustitución es igual o superior al 50%. Los mejores resultados se obtienen para un reemplazo del 50%, donde se produce un incremento de la resistencia a compresión del HMARF del 16%. Para una sustitución del 35% se aprecia un descenso de la resistencia del 10% respecto al HMARF de control. Este resultado coincide con los resultados obtenidos por Park [162]. Puede observarse una pérdida de la resistencia para una sustitución del 35% mientras que para el resto de niveles de sustitución se muestra un incremento en la resistencia respecto al valor del hormigón de control. Esto puede ser debido a que se ha empleado un humo de sílice densificado con una granulometría distinta, con un menor porcentaje de finos y un mayor tamaño de partícula. Esto produce un peor empaquetamiento y compacidad de la matriz, aumentando la cantidad de huecos del hormigón y, por tanto, reduciendo su resistencia a compresión.

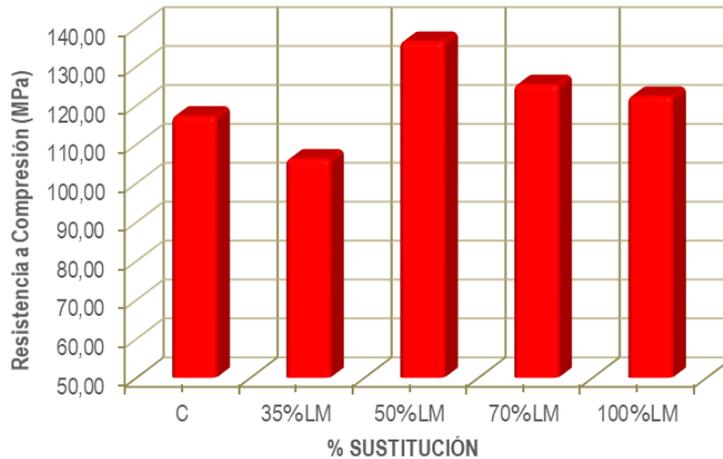


Figura 122. Resistencia a compresión del HMARF con LM.

En la **figura 123** se observa la resistencia media a compresión del HMARF, donde se ha reemplazado la arena 0/0,5 mm por AM procedente de la mina de fluorita. Se aprecia un incremento de resistencia para cualquier nivel de sustitución. Esto puede ser debido a la diferencia existente entre el tamaño máximo de árido de la arena silícea y el de la arena procedente de la mina de fluorita ya que, sobre todo en hormigones ricos en cemento, cuanto menor sea aquel, mayor será la resistencia a compresión del hormigón. Se puede ver que los valores más elevados se obtuvieron para las amasadas del 35%. El descenso de la resistencia a compresión en sustituciones mayores puede ser debido a que al aumentar la cantidad de finos el grado de empaquetamiento de la estructura granular se reduce, mientras que en el 35% de sustitución alcanzaba niveles óptimos. Además, para el 50%, el 70% y el 100% se puede decir que el porcentaje de AM no repercute sobre la resistencia media a compresión.

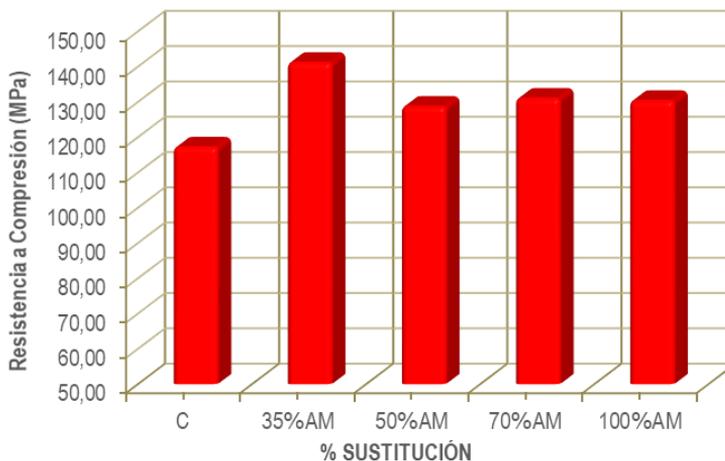


Figura 123. Resistencia a compresión del HMARF con AM.



En la **figura 124** se observa la resistencia a compresión media del HMARF correspondiente a todas las amasadas con sustitución de la harina de sílice, en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%, por finos de granito (FG), finos de granito con granalla (FGG), finos de mina (FM) o finos de los lavaderos de mina (LM). Para un nivel del reemplazo del 35% se observa una mayor resistencia a compresión en el HMARF fabricado con residuos de granito (FG y FGG). Esto puede ser debido, por un lado, a la alta resistencia que tienen las partículas de granito y a un menor tamaño de las mismas. Además, los residuos de la cantera de granito tienen un contenido de Al_2O_3 próximo al 11%, lo que favorece la acción puzolánica de la mezcla. Esta misma tendencia también se aprecia cuando el nivel de reemplazo es del 70% y del 100%, aunque las variaciones que se producen respecto a los residuos de la mina de fluorita (FM y LM) son mayores. También cabe destacar los mayores valores correspondientes a los FGG, respecto al resto de residuos. Esto puede ser debido a la presencia de un 14% de partículas muy pequeñas de óxido de hierro que pueden favorecer la actividad puzolánica de la mezcla, aunque de forma más atenuada que el sílice y la alúmina.

En el caso de los finos procedentes de las minas de fluorita (FM y LM) y un nivel de sustitución igual o superior al 50% se aprecia una mayor variación en los resultados. Esto puede ser causado por un mayor contenido CaO en la arena LM que puede contribuir a la formación de gel CSH y, por tanto, al incremento de resistencia.

Por último, se puede ver que, por norma general, se produce un incremento en la resistencia a compresión media del HMARF cuando se sustituye la harina de sílice por alguno de estos residuos independientemente del nivel de reemplazo. Los mejores resultados se obtienen para una sustitución del 50%.

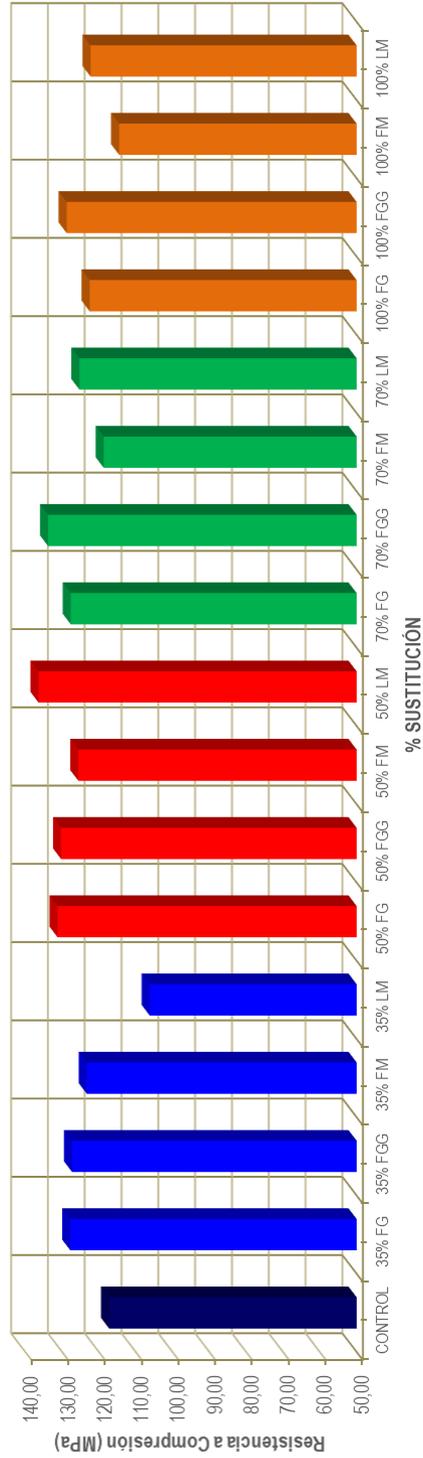


Figura 124. Resistencia a compresión del HMARF con sustitución de la harina de sílice.



En la **figura 125** se observa la resistencia a compresión media del HMARF con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por gruesos de granito (GG) o la arena 0/0,5 mm por arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). Se puede ver que se produce un incremento de la resistencia a compresión del HMARF, respecto al hormigón de control, que varía entre el 8,5% y el 20,5% para los GG y entre el 9,5% y el 20,5% para la AM. Esto puede ser debido, como ya se ha comentado con anterioridad, a una reducción de las partículas de mayor tamaño presente en cada uno de los residuos en comparación con las arenas silíceas que sustituyen. En el caso de los GG, también puede influir la mayor resistencia del granito respecto a los áridos silíceos. Para un nivel de reemplazo igual o superior al 50%, el porcentaje no repercute sobre la resistencia media a compresión ya que las variaciones que se producen son muy pequeñas y se encuentran dentro de los márgenes de error propios del ensayo.

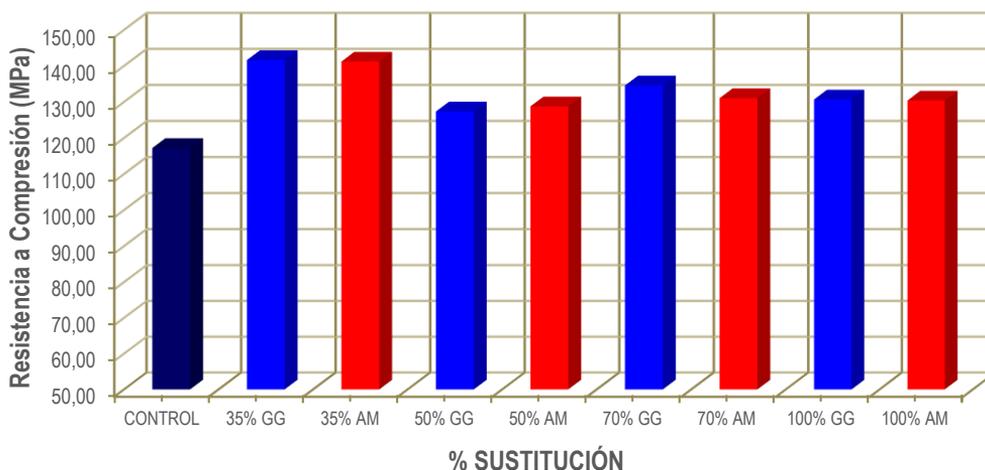


Figura 125. Resistencia a compresión del HMARF con sustitución de la arena silícea.

A la vista de estos resultados, se puede establecer que la utilización de cualquiera de los seis tipos residuos industriales, como reemplazo parcial o total de alguno de los áridos naturales, produce una ganancia de la resistencia a compresión del HMARF a los 28 días, respecto al hormigón de control. Los mayores valores se obtienen para los HMARF fabricados con residuos procedentes de la cantera de granito (FG, FGG y GG).



4.2.5 Análisis de los resultados obtenidos sobre el módulo de elasticidad.

El análisis se ha realizado con los resultados medios obtenidos de los ensayos que se realizaron para obtener el módulo de elasticidad en cada una de las amasadas realizadas.

En la **figura 126** se aprecia la variación del módulo de elasticidad al utilizarse FG como sustitutos de la harina de sílice. Se puede observar que las diferencias en los valores medios del módulo de elasticidad son mínimas respecto a los valores obtenidos en el HMARF de control. Solo cuando el porcentaje de sustitución es del 50% se aprecia una mayor variación, pero está variación es del 5% respecto al HMARF de control, por tanto, se puede decir que los FG no influyen sobre el módulo de elasticidad del HMARF. Las ligeras variaciones están dentro de la variabilidad de los resultados obtenidos.

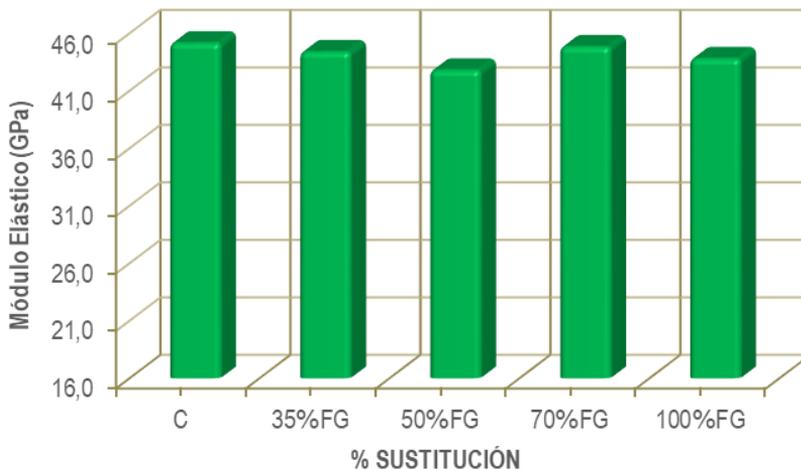


Figura 126. Módulo de elasticidad del HMARF con FG.

En la **figura 127** puede observarse que al emplear residuos FGG, como reemplazo de la harina de sílice, se produce un descenso en el módulo de elasticidad del HMARF en comparación con el HMARF de control. Las variaciones que se producen debido a la incorporación de FGG son pequeñas, entre el 3,5% y el 8,5%. En cuanto a la cantidad de FGG, solo para el 70% y el 100% se muestra una ligera influencia del porcentaje de sustitución.

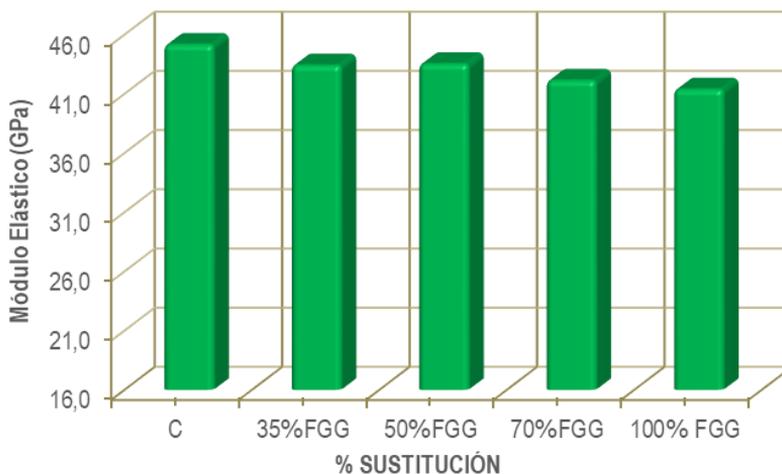


Figura 127. Módulo de elasticidad del HMARF con FGG.

En la **figura 128** se aprecia la influencia que tiene la utilización de GG como sustitutos de la arena 0,5/1,6 mm, sobre el módulo de elasticidad del HMARF. Los valores que presenta son más reducidos respecto al HMARF de control. Estos valores son entre un 5% y un 10% inferiores. La variación del valor del módulo de elasticidad entre los distintos porcentajes de sustitución es inferior al 5%. Estas variaciones, para los diferentes porcentajes de sustitución, están dentro de los márgenes de error del ensayo. Se puede decir que la utilización de GG produce una ligera variación en el módulo de elasticidad del HMARF mientras que el porcentaje no tiene influencia.

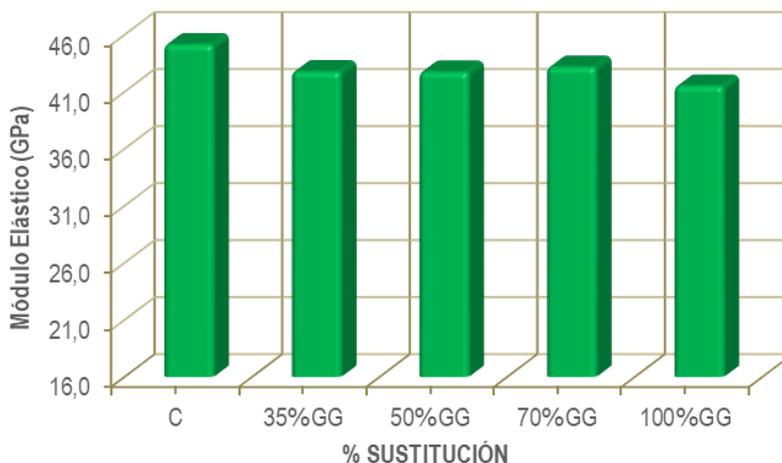


Figura 128. Módulo de elasticidad del HMARF con GG.



En la **figura 129** se observa la influencia que tiene la utilización de FM, como sustituto de la harina de sílice, sobre el módulo de elasticidad del HMARF. Para sustituciones iguales o superiores al 50% el módulo se reduce aproximadamente un 7% independientemente del porcentaje. Esto muestra una influencia del tipo de residuo pero no del porcentaje. Sin embargo, se puede ver que para una sustitución del 35% la reducción que se produce en el módulo de elasticidad es mucho más notable. A pesar de que los resultados medios de la resistencia a compresión obtenidos para este nivel de reemplazo fueron similares que en el resto de niveles (50%, 70% y 100%), el descenso en el módulo de elasticidad puede ser debido a que para la amasada del 35% de FM el tipo de humo de sílice empleado fue diferente. Esta circunstancia ha podido originar una mayor deformabilidad en el hormigón.

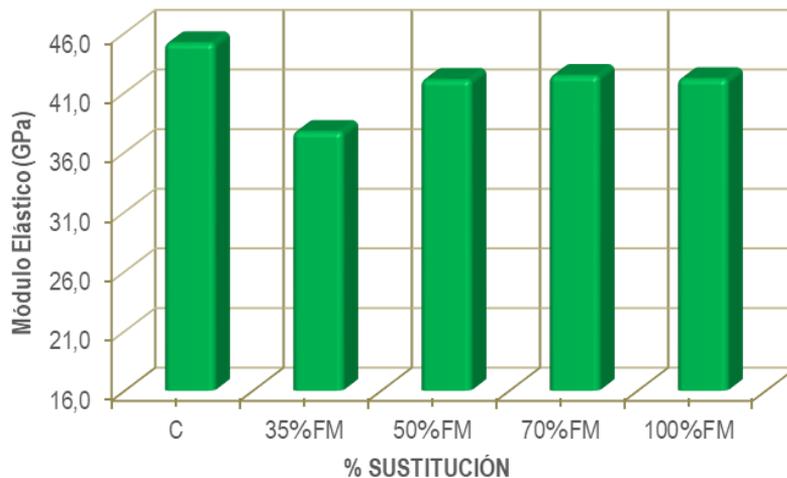


Figura 129. Módulo de elasticidad del HMARF con FM.

En la **figura 130** se observa la influencia que tiene la utilización de LM, como sustituto de la harina de sílice, sobre el módulo de elasticidad del HMARF. En primer lugar, se puede ver un descenso en los valores del módulo de elasticidad al utilizar este tipo de residuo, respecto al valor medio obtenido para el HMARF de control. A partir de una sustitución del 50% de la harina de sílice se puede ver un descenso progresivo en el módulo de elasticidad a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución. Para una sustitución del 35% se observa una reducción del módulo de elasticidad mucho más notable que para el resto de niveles de reemplazo. Esta reducción en el módulo es del 15% y puede estar relacionada con la baja resistencia media a compresión y, por tanto, la baja compacidad que presenta este hormigón. Como sucede para el 35% de FM, otro factor que ha podido influir es la utilización de otra clase de humo de sílice para la amasada del 35% de LM.

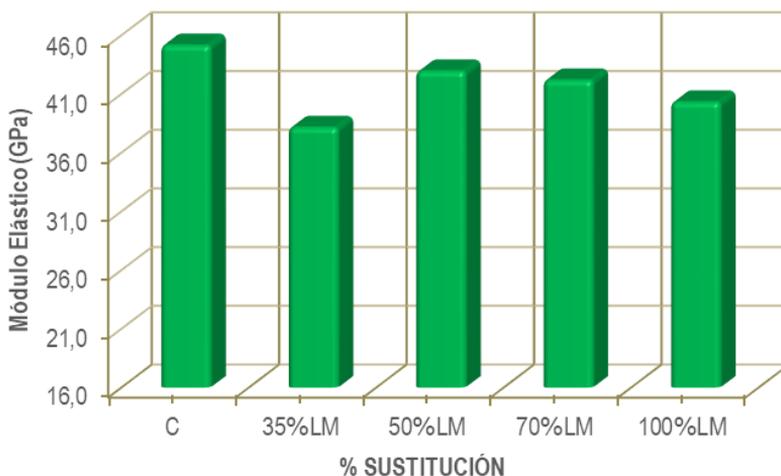


Figura 130. Módulo de elasticidad del HMARF con LM.

En la **figura 131** se analiza la influencia que tiene sustituir la arena sílicea más fina por una arena residual procedente de los finos de la mina de fluorita (AM) sobre el módulo de elasticidad del HMARF. Se puede ver un descenso paulatino en los valores del módulo de elasticidad a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Aunque se aprecia una influencia de la AM sobre el módulo de elasticidad del HMARF, ésta es pequeña. Para el 100% se produce una variación del 6,5% respecto al HMARF de control. Por otro lado, se puede ver que el porcentaje de sustitución apenas influye. Las diferencias en los valores medios del módulo obtenidas son mínimas entre sí y, posiblemente, sean consecuencia de la variabilidad que se produce en estos hormigones. Solo cuando se aumenta el porcentaje del 50% al 70% se aprecia una mayor variación.

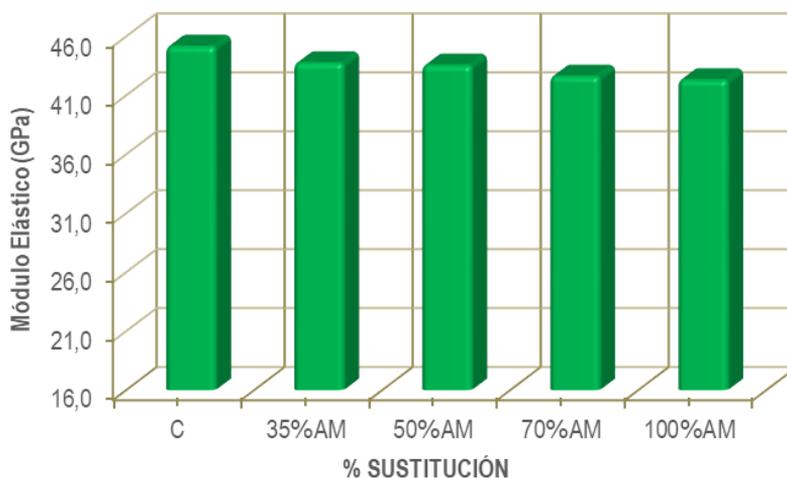


Figura 131. Módulo de elasticidad del HMARF con AM.



En la **figura 132** se observa el módulo de elasticidad medio del HMARF correspondiente a todas las amasadas con sustitución de la harina de sílice, en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%, por finos de granito (FG), finos de granito con granalla (FGG), finos de mina (FM) o finos de los lavaderos de mina (LM). Para el 35% se aprecia que el tipo de residuo tiene una ligera influencia sobre el módulo de elasticidad del HMARF. Así, en los HMARF con residuos procedentes de canteras de granito (FG y FGG), la variación en el módulo de elasticidad es mínimo. Sin embargo, para los HMARF con residuos de las minas de fluorita (FM y LM), la variación en el módulo de elasticidad se hace mucho más acusada. Sin embargo, para el resto de niveles de sustitución se puede ver que la procedencia y el tipo de residuo no tienen mucha influencia sobre esta variable. Solo para el 100% se aprecia una mayor variación módulo de elasticidad del HMARF. A pesar de todo sigue siendo pequeña.

Por tanto, se puede decir que el tipo de residuo tiene cierta influencia en el módulo de elasticidad del HMARF. Sin embargo, la variación del porcentaje de sustitución para cada residuo no tiene influencia alguna ya que, aunque existen ligeras variaciones, estas son consecuencia de la variabilidad existente en la fabricación de estos hormigones. Además, en el caso de los FG la variación en el módulo se puede considerar despreciable en comparación al HMARF de control.

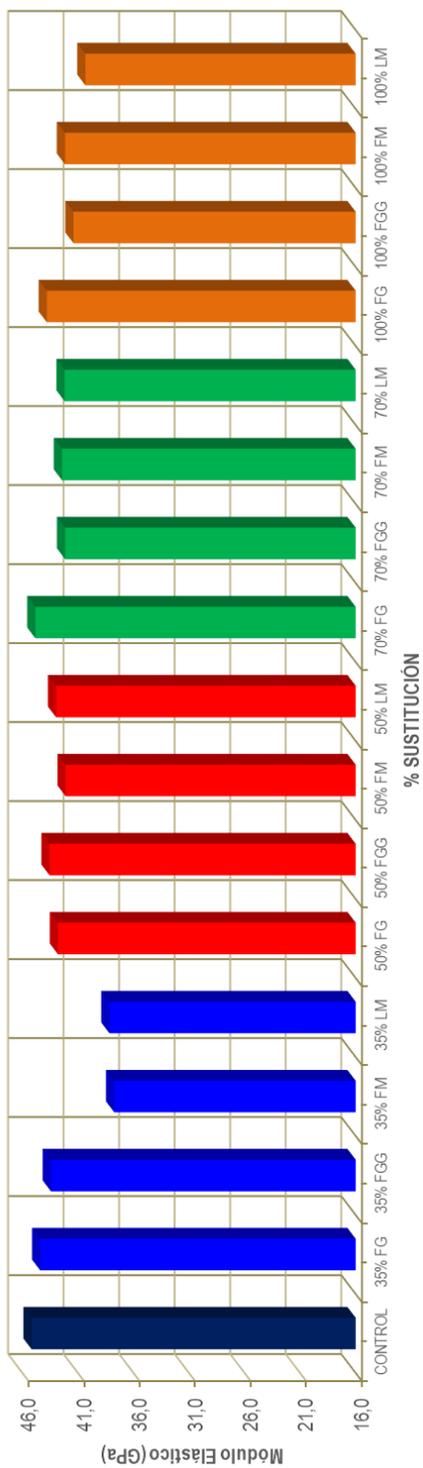


Figura 132. Módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la harina de sílice.



En la **figura 133** se observa el módulo de elasticidad medio del HMARF con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por gruesos de granito (GG) o la arena 0/0,5 mm por arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). Aunque para todos los HMARF con reemplazo de la arena silícea se observa un descenso en el módulo de elasticidad respecto al valor medio del HMARF de control, las variaciones que se producen son muy pequeñas. La máxima variación se produce para el HMARF con un 100% de GG y es del 8%. Por lo tanto, se puede establecer que el tipo de residuo tiene una ligera influencia sobre el valor del módulo de elasticidad y, sin embargo, el porcentaje en el que se sustituye no presenta influencia alguna.

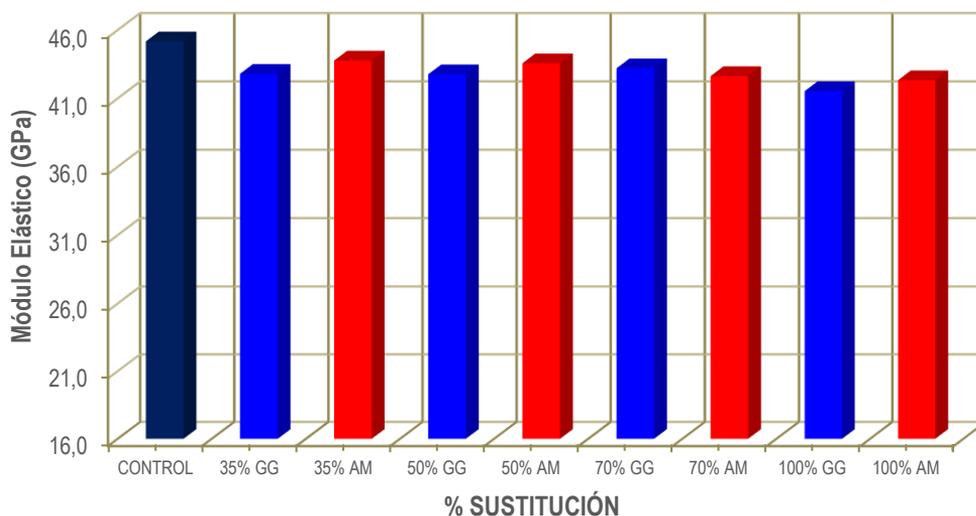


Figura 133. Módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la arena silícea.

A modo de resumen, la utilización de cualquiera de los seis tipos residuos utilizados, como reemplazo parcial o total de alguno de los áridos naturales, produce un ligero descenso en el valor del módulo de elasticidad del HMARF mientras que el porcentaje de sustitución apenas tiene influencia en el valor del mismo.

4.2.5.1 Variación de los resultados obtenidos a partir del ensayo de módulo de elasticidad en compresión y del ensayo de resistencia a flexotracción.

A continuación, se observan los resultados medios del módulo de elasticidad obtenido a partir del ensayo recogido en la norma, UNE-EN 12390-13 [157], y el que se obtiene a partir del ensayo a flexotracción a cuatro puntos sin entalla según la norma NF P18-470 [131]. Las deformaciones obtenidas en el ensayo a flexotracción, que posteriormente se utilizaron para determinar el módulo de elasticidad, se



midieron mediante un LVDT, excepto para las seis amasadas del 35% cuyas medidas se realizaron utilizando el sistema óptico Aramis.

El valor del módulo de elasticidad según la norma UNE-EN 12390-13 viene dado por la siguiente expresión:

$$E = \frac{\sigma_s - \sigma_i}{\varepsilon_s - \varepsilon_i}$$

E es el módulo de elasticidad secante.

σ_s es la tensión media correspondiente a la tensión nominal superior.

σ_i es la tensión media correspondiente a la tensión nominal inferior.

ε_s es la deformación media para la tensión superior.

ε_i es la deformación media para la tensión inferior.

Por otra parte, el módulo de elasticidad a partir del ensayo de flexotracción, se obtiene según siguiente expresión:

$$E = 2,40 \times h \times m$$

E es el módulo de elasticidad secante.

h es el ancho de la probeta.

m es la pendiente del tramo lineal de la curva carga-flecha del ensayo de flexotracción.

En la **figura 134** se observa la variación que se produce en los resultados correspondiente al valor módulo de elasticidad del HMARF obtenidos mediante el ensayo de compresión y en el ensayo de flexotracción para todas aquellas amasadas donde se ha reemplazado la harina de sílice, en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%, por finos de granito (FG), finos de granito con granalla (FGG), finos de mina (FM) o finos de los lavaderos de mina (LM). Para los HMARF con residuos de granito (FG, FGG) las variaciones que se producen en los resultados del módulo elástico son pequeñas cuando el porcentaje de sustitución es igual o superior al 50%. Para los HMARF con una sustitución del 35%, medidas realizadas



mediante el sistema Aramis, se puede ver que las variaciones en los resultados de módulo de elasticidad están en la línea de los obtenidos mediante un LVDT.

En el caso de los HMARF con residuos procedentes de la mina de fluorita (FM, LM) la variación que se produce en los resultados de módulo elástico entre ambos ensayos es ligeramente superior a la que se produce para los HMARF con residuos de granito. Cuando se realiza una sustitución del 35%, del 50% y del 100%, se aprecia una mayor variación de los resultados, comprendida entre el 5% y 20%. Sin embargo, para el 70% apenas se aprecia variación del módulo elástico, inferior al 2%.

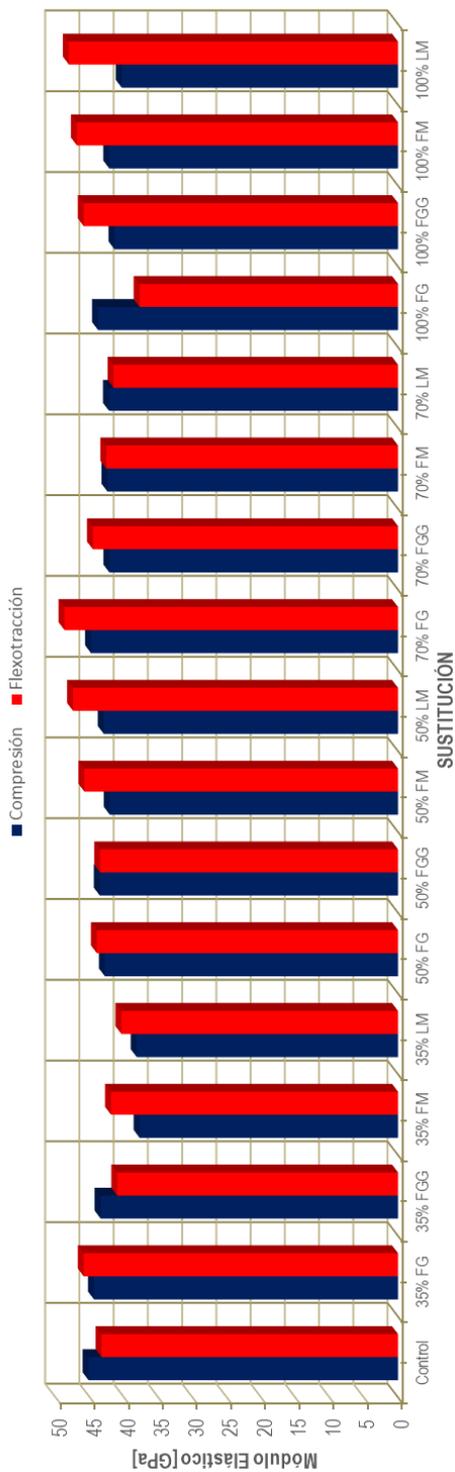


Figura 134. Variación del módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la harina de sílice.



Por otro lado, en la **figura 135** se muestra esta variación cuando se realiza la sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por gruesos de granito (GG) o la arena 0/0,5 mm por la arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). En el caso de los HMARF con GG, las variaciones que se producen en los resultados del módulo elástico son pequeñas, mientras que para los HMARF con AM se aprecia una mayor variación entre los resultados obtenidos en ambos ensayos, No obstante, estas variaciones siguen siendo pequeñas. Solo para el 100% se aprecia una mayor variación (13%).

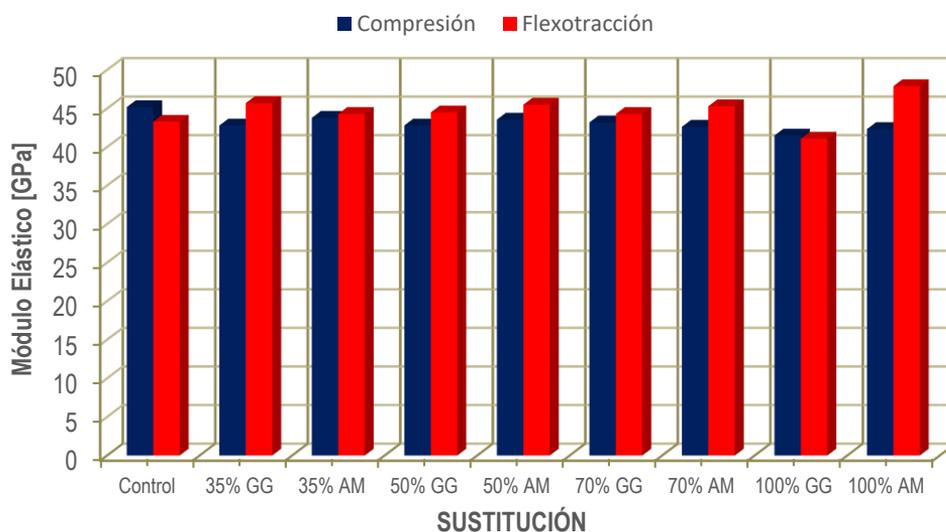


Figura 135. Variación del módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la arena sílicea.

4.2.6 Análisis de los resultados obtenidos sobre la resistencia a flexión.

El análisis se ha realizado con los resultados medios obtenidos de los ensayos de flexotracción llevados a cabo.

En la **figura 136** se observa cómo repercute sobre la resistencia media a flexión del HMARF la adición de FG sustituyendo a la harina de sílice. La sustitución del 50% de la harina de sílice por FG genera una reducción en la resistencia del 22%, mientras que para el 70% y el 100% la caída es mucho menor. Para el 35% de sustitución se observa un incremento de la resistencia a flexión del 6% debido, posiblemente, a un mejor empaquetamiento del conjunto de áridos. La caída de resistencia en la amasada del 50% puede ser debida al reducido número de ensayos por amasada, o a ligeras modificaciones durante el procedimiento de amasado y fabricación. Sería muy conveniente volver a repetir dicha amasada ya que, como puede observarse, eliminando la misma la tendencia en el resto es ligeramente decreciente. Por otra



parte, el coeficiente de variación en cada una de las series de los resultados obtenidos invita a pensar que, debido a su variabilidad, el porcentaje de sustitución de este residuo no influye significativamente en el valor de la resistencia a flexión del hormigón.

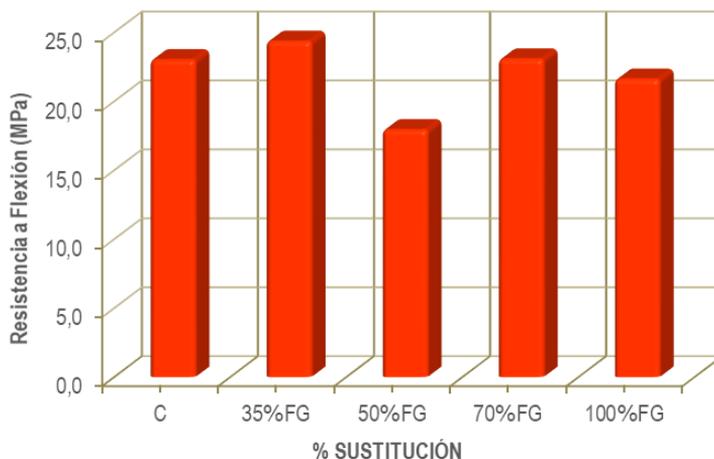


Figura 136. Resistencia a flexión del HMARF con FG.

En la **figura 137** se muestra como la adicción de FGG, como reemplazo de la harina de sílice, en un porcentaje igual o superior al 50%, repercute negativamente sobre la resistencia media a flexión del HMARF. Esta pérdida de resistencia llega a ser del 22% para una sustitución del 100% de la harina de sílice. También se observa que, para un nivel de sustitución del 35%, se produce un incremento de la resistencia a flexión del 12%. El incremento de resistencia del 35% FGG, puede ser debido al alto contenido de partículas finas presentes en este residuo lo que mejora el empaquetamiento y, por tanto, la resistencia del HMARF. Sin embargo, la pérdida de resistencia que se observa a partir del 50% puede ser consecuencia de un exceso en la cantidad de finos. No obstante, como se menciona anteriormente, esta variación en los resultados puede ser debida al reducido número de probetas ensayadas y a ligeras modificaciones en el proceso de fabricación que generen cambios en la distribución de las fibras de acero.

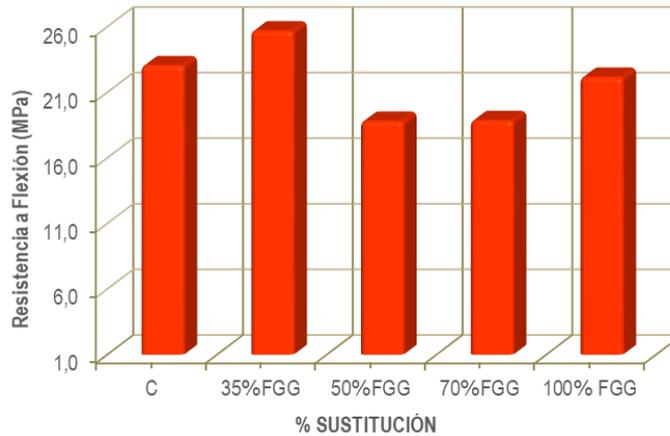


Figura 137. Resistencia a flexión del HMARF con FGG.

En la **figura 138** se aprecia la influencia de la adición de GG, como reemplazo de la arena 0,5/1,6 mm, sobre la resistencia media a flexión del HMARF. Se observa que para una sustitución del 50% se produce la mayor pérdida en la resistencia a flexión (14%). Sin embargo, para el resto de niveles de sustitución la variación es muy reducida. Para porcentajes del 35% y del 70% se observa un incremento de resistencia a flexión del 11% y el 2%, respectivamente. Estos incrementos posiblemente sean causados por la mayor finura de los GG logrando mejorar la compacidad del hormigón. Sin embargo, para una sustitución del 100% se produce una pérdida de la resistencia a flexión del 7% debido al exceso de GG. De nuevo, el comportamiento es muy similar a los FG ya que prescindiendo de la amasada del 50% el resto de valores siguen una tendencia ligeramente decreciente según se incrementa el tipo de residuo. Aún así, la variabilidad de los resultados predomina sobre las variaciones experimentadas por el porcentaje de residuos sustituidos.

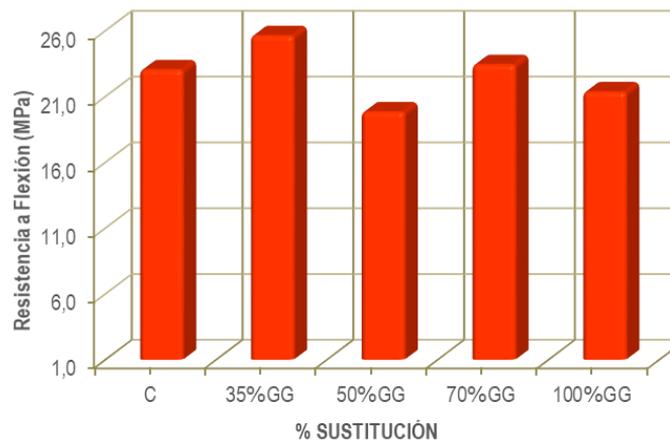


Figura 138. Resistencia a flexión del HMARF con GG.



En la **figura 139** se observa como la adicción de FM de la mina de fluorita, sustituyendo a la harina se sílice, tiene una influencia negativa sobre la resistencia media a flexión del HMARF. Los valores obtenidos para los diferentes niveles de sustitución, excepto para el 50%, están por debajo de los 20 MPa. El valor medio más bajo se ha obtenido para una sustitución del 35%, llegando a producirse una pérdida de resistencia del 23%. Esta menor resistencia puede ser debida al mayor tamaño de las partículas de FM, respecto a la harina de sílice dando lugar a una resistencia a flexión más baja. Aunque la influencia de los FM sobre el valor de la resistencia a flexión es evidente, el porcentaje de sustitución no influye sobre el valor de la misma.

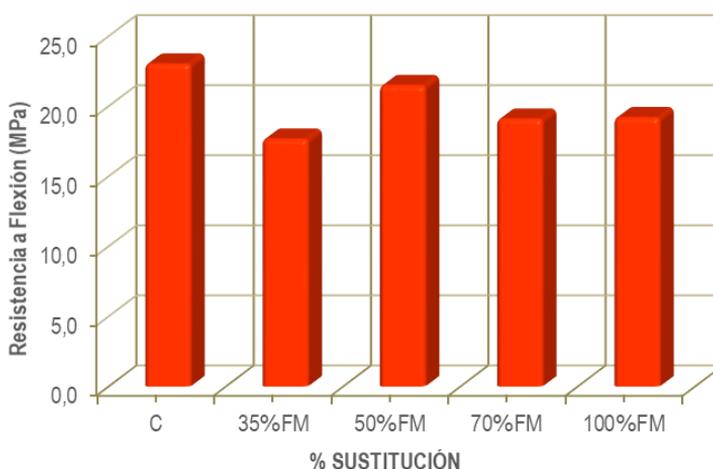


Figura 139. Resistencia a flexión del HMARF con FM.

En la **figura 140** se muestran los resultados de la adicción de LM, como reemplazo de la harina se sílice. Hasta el 70% de sustitución, aunque la variación es decreciente, se mantiene dentro de unos valores similares. Cuando la sustitución es del 100% repercute de manera significativa sobre la resistencia media a flexión del HMARF. De nuevo, con sustituciones de hasta el 70% la variabilidad en los resultados está por encima de la variabilidad propia de la variable analizada. Parece que la reducción de la cantidad de finos no afecta significativamente a la compacidad del hormigón hasta que la sustitución de la harina no se realiza íntegramente.

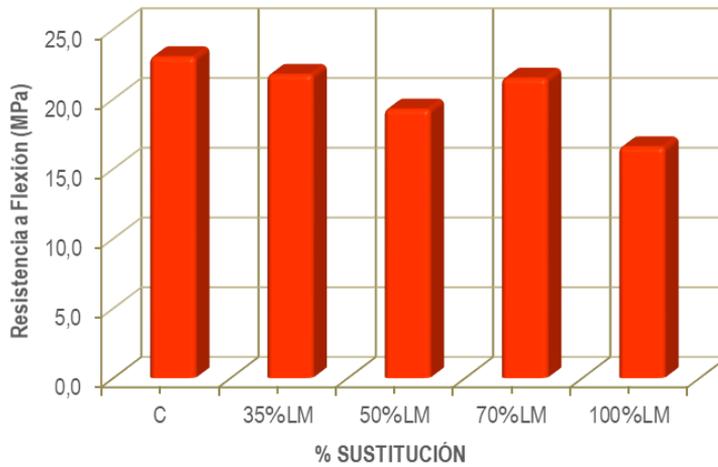


Figura 140. Resistencia a flexión del HMARF con LM.

En la **figura 141** se aprecia la influencia de sustituir la arena 0/0,5 mm por la AM procedente de las minas de fluorita, sobre la resistencia media a flexión del HMARF. La sustitución de la arena más fina por AM genera, hasta un nivel de sustitución del 70% e independientemente del mismo, una pérdida muy pequeña de resistencia, respecto al HMARF de control. En el caso de una sustitución del 100% se aprecia una pérdida significativa del 17%. Esta pérdida de resistencia que se observa para todos los niveles de sustitución puede ser debida al cambio que experimenta la estructura granular del hormigón, aunque dicho cambio no sea relevante hasta que se llega a la sustitución íntegra de la arena.

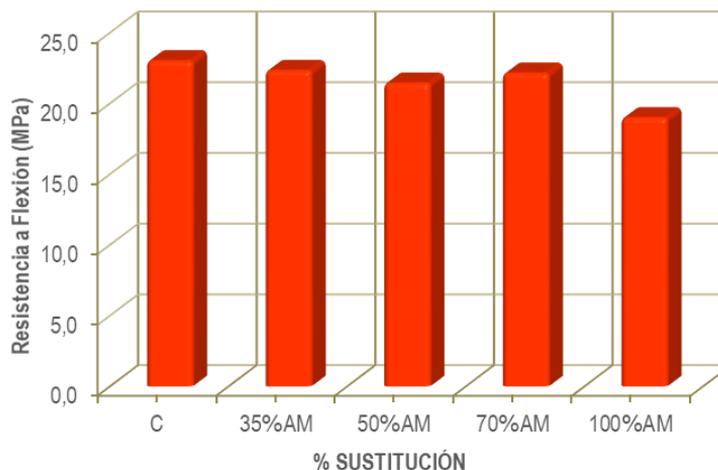


Figura 141. Resistencia a flexión del HMARF con AM.

En la **figura 142** se observa la resistencia a flexión media del HMARF correspondiente a todas las amasadas con sustitución de la harina de sílice, en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%, por



finos de granito (FG), finos de granito con granalla (FGG), finos de mina (FM) o finos de los lavaderos de mina (LM). Para un porcentaje de sustitución del 35% se puede apreciar una clara diferencia entre los valores obtenidos según su procedencia. En los residuos procedentes de las canteras de granito (FG y FGG) se produce un aumento en la resistencia a flexión del HMARF del 6% y del 12 %, respectivamente. Sin embargo, en las amasadas donde se emplearon residuos procedentes de las minas de fluorita (FM y LM) se produce una pérdida en la resistencia a flexión del HMARF. Este incremento en la resistencia por parte de los HMARF con finos procedentes de la cantera de granito puede ser debido a que los FG y FGG son más finos que la harina de sílice lo incrementan la compacidad del hormigón y, por tanto, su resistencia.

Por otro lado, los bajos resultados obtenidos cuando se sustituye la harina de sílice por FM o LM pueden ser a causa del mayor tamaño de partícula de estos residuos respecto a la harina de sílice. Debido a esto la matriz del hormigón es menos compacta y la resistencia decrece.

Para una sustitución del 50% se aprecia una mayor resistencia a flexión en los residuos procedentes de la mina de fluorita. También, se aprecia una pérdida de resistencia de los HMARF con residuos de granito respecto a los valores obtenidos para el 35% posiblemente debido a un exceso en la cantidad de finos.

Para una sustitución del 70% y el 100%, al igual que sucede para el 35%, se vuelve a ver que, para los HMARF con residuos de mina su mayor tamaño de partícula respecto a la harina de sílice perjudica de forma significativa la compacidad del hormigón. Esto produce una pérdida de resistencia que varía entre el 6% y el 28% respecto al HMARF de control. En el caso de los residuos de granito se observa un aumento en la resistencia media a flexión respecto a las amasadas del 50%. Al igual que sucede con los HMARF con residuos de mina, aunque se observa una pérdida de resistencia a flexión respecto al HMARF de control, ésta no es tan significativa. Además, para el HMARF con un 70% de FG no se produce variación. A la vista de estos resultados se puede decir que el tamaño de partícula y la cantidad de finos son las variables que más influyen en la resistencia a flexión del HMARF.

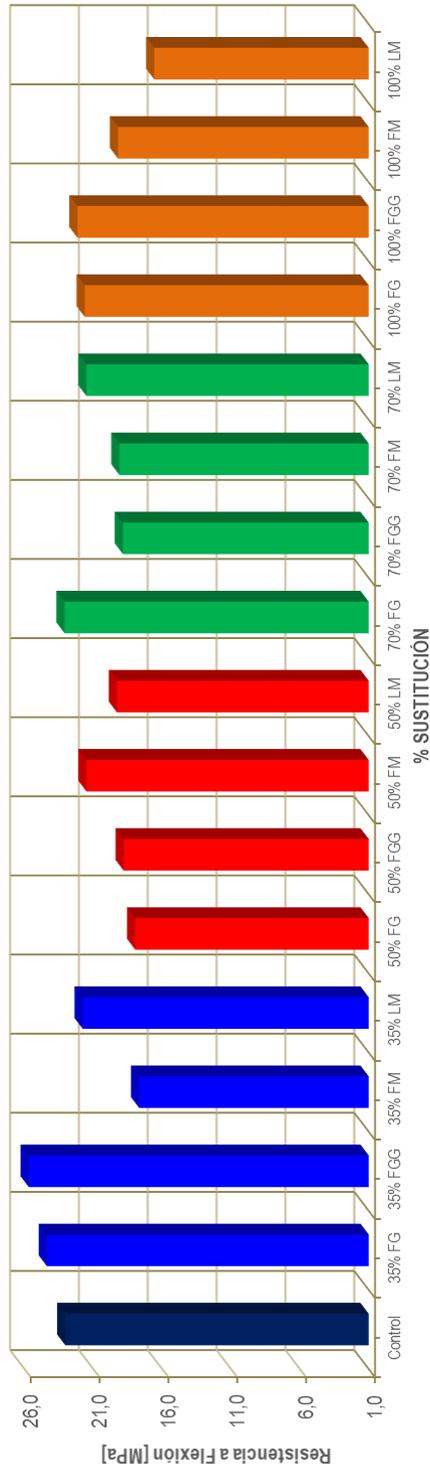


Figura 142. Resistencia a flexión del HMARF con sustitución de la harina de sílice.



En la **figura 143** se observa la resistencia a flexión media del HMARF con sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por gruesos de granito (GG) o la arena 0/0,5 mm por arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). Se puede ver que el tipo de residuo tiene una gran influencia sobre la resistencia a flexión. Al utilizar un 35% de GG, procedentes de la cantera de granito, se consigue una resistencia media de 25,6 MPa que equivale a un aumento del 11%, respecto al HMARF de control. Este incremento puede ser por una mejor adherencia entre el residuo, la pasta de cemento y las fibras de acero debido a la forma más irregular de las partículas de granito. Sin embargo, para el 35% de AM se puede apreciar una ligera pérdida respecto al HMARF de control, posiblemente como consecuencia de la baja consistencia y mala trabajabilidad que se obtuvo para esta amasada, con lo que no se consiguió obtener completamente la autocompactabilidad de la mezcla. Sin embargo, para un nivel de sustitución del 50% se aprecia una mayor resistencia a flexión del HMARF con AM respecto a los GG.

Para una sustitución del 70% se observa que la variación en los resultados medios obtenidos, para ambos residuos, es muy pequeña (< 5%) respecto al HMARF de control. Por tanto, el tipo de residuo no tiene una influencia significativa sobre la resistencia a flexión del HMARF cuando se reemplaza el 70% de alguna de las arenas silíceas. Además, en el caso del 70% de GG se aprecia un ligero incremento en la resistencia (1,7%). Al igual que sucede para el 35%, esta mejora en la resistencia, posiblemente, sea causada por una mayor cantidad de finos en los GG, respecto a la arena silícea que sustituye y su mejor adherencia con la pasta de cemento debido a la forma irregular y angulosa de las partículas de granito.

Para un nivel de sustitución del 100% se puede apreciar una pérdida en la resistencia a flexión más o menos pronunciada en función del tipo de residuo. Mientras que para el HMARF con un 100% de GG la pérdida está entorno al 7%, posiblemente debido a un exceso de finos en los GG, cuando se emplea un 100% de AM se origina una pérdida del 17%. Estas pérdidas de la resistencia a flexión pueden ser debidas a la mayor finura de los GG y la AM respecto a las arenas silíceas, lo que genera un exceso de finos en el HMARF.

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que la sustitución de la arena 0/0,5 mm por la AM tiene una mayor repercusión sobre la resistencia a flexión del HMARF a pesar de que su tasa de reemplazo del total de los áridos naturales sea menor en comparación con la sustitución de la arena 0,5/1,6 mm por GG.

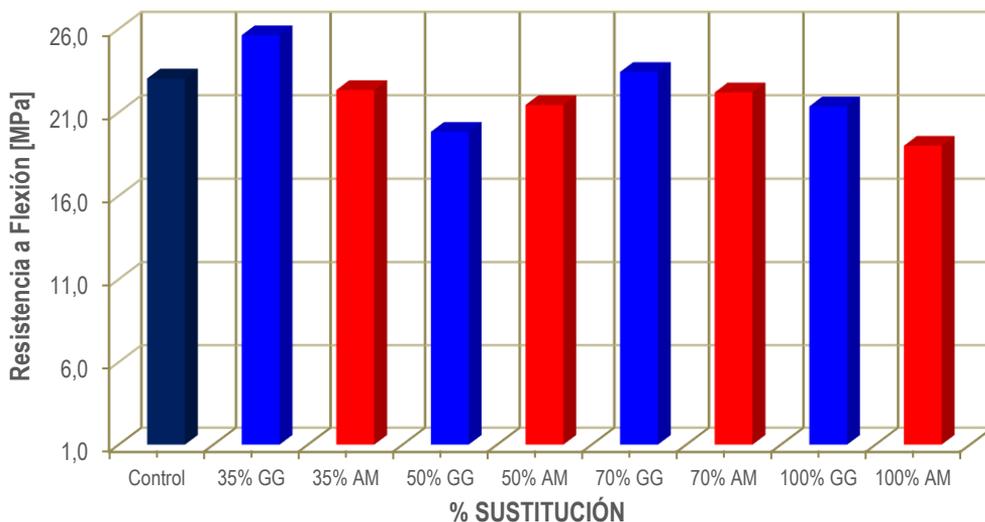


Figura 143. Resistencia a flexión del HMARF con sustitución de la arena silícea.

En resumen, se puede decir que, el lugar de procedencia es el factor que mayor influencia tiene sobre la resistencia a flexión del HMARF. Con la utilización de residuos procedentes de la cantera de granito (FG, FGG y GG) se obtienen unos valores más altos de resistencia a flexión, comparables a los del HMARF de control. Sin embargo, cuando en los HMARF fabricados se utilizan residuos procedentes de la mina de fluorita (FM, LM y AM) se aprecia una pérdida de resistencia a flexión. En cuanto al nivel de sustitución y teniendo en cuenta la variabilidad de los resultados obtenidos para cada serie de ensayos, se puede decir, que no influye de manera significativa en el valor de la resistencia a flexión del hormigón.

4.2.7 Análisis del comportamiento a tracción.

El comportamiento a tracción se ha determinado mediante análisis inverso, utilizando la metodología propuesta por López Martínez [158], a partir de los valores medios obtenidos en los ensayos de flexotracción en cuatro puntos. En el capítulo 3 se ha detallado todo el proceso.

Dicho análisis se ha llevado a cabo a partir de los diagramas tensión-deformación y tensión-abertura de fisura. El diagrama tensión-deformación queda definido por la resistencia a fisuración, la deformación correspondiente a la tensión de fisuración $\varepsilon_{t,e}$, la resistencia última a tracción, $f_{t,u}$, y la deformación última a tracción, $\varepsilon_{t,u}$. El diagrama tensión-abertura de fisura muestra la variación que se produce en el tamaño de la fisura del HMARF una vez que se ha alcanzado su resistencia última a tracción. Este diagrama tiene una pendiente descendente y queda definido por la resistencia última a tracción, $f_{t,u}$,



la abertura de fisura a un tercio de la carga máxima w_d , y la abertura de fisura a máxima a tensión nula w_{max} , que en nuestro caso se ha tomado la mitad de la longitud de la fibra (6,5 mm).

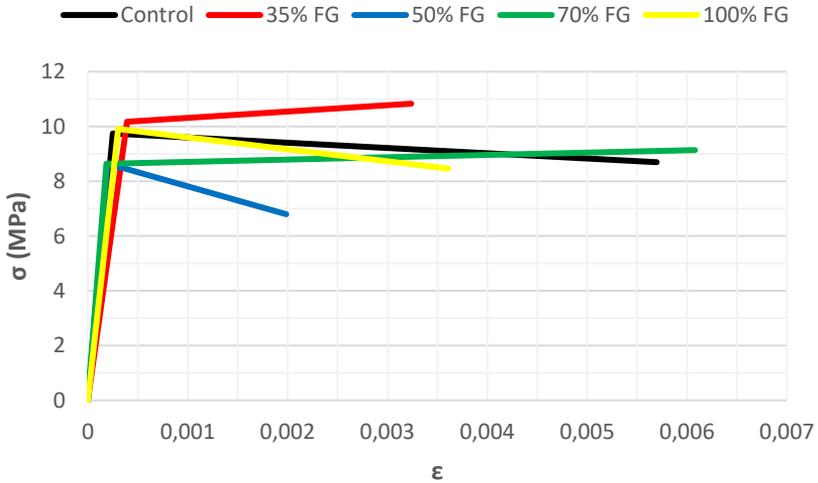
Se pueden distinguir dos tipos de comportamiento del HMARF una vez que ha alcanzado la tensión de fisuración. En primer lugar, un comportamiento de endurecimiento (hardening) que implica que, una vez que se alcanza la tensión de fisuración, el valor de la tensión sigue aumentando, aunque las deformaciones se incrementan sensiblemente. Por otro lado, se puede producir un comportamiento de reblandecimiento (softening). Este tipo de comportamiento se origina cuando después de producirse las primeras fisuras la tensión comienza a descender con un incremento sensible en la deformación. Esta variación en el comportamiento está influenciada por el tipo de fisuración que se produce durante el ensayo de flexotracción. Un comportamiento de endurecimiento suele darse cuando se reproduce un patrón de fisuras a lo largo de la probeta ensayada mientras que, si solo se produce una sola fisura durante el ensayo, suele originarse un reblandecimiento del hormigón con fibras [140].

En la **figura 144a** se muestra la influencia de los FG sobre la tensión a tracción y la correspondiente deformación experimentada por el HMARF. Se puede observar que el porcentaje de sustitución apenas tiene influencia sobre la deformación que experimenta el HMARF al alcanzar la resistencia a fisuración, obteniendo en todos los casos una deformación próxima al 0,3‰.

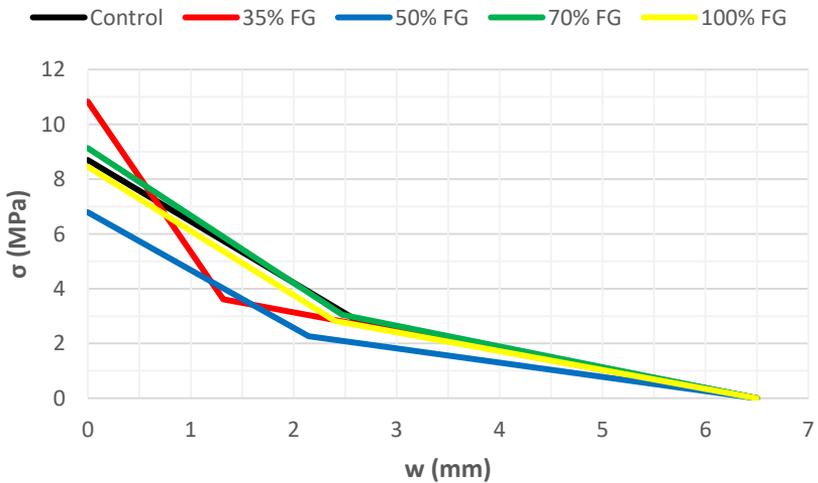
En cuando a los valores de deformación máxima que experimenta el HMARF con FG al alcanzar la tensión última a tracción varía mucho en función del porcentaje de sustitución. Se aprecia que, salvo para el 70%, los valores restantes se alejan bastante de la deformación del 5,7‰ que se aprecia para el HMARF de control. Además, en el caso de las amasadas con un 50% y 100% de FG se observa que la resistencia última a tracción es inferior a la resistencia a fisuración de la matriz lo que implica un reblandecimiento del hormigón una vez que ha comenzado a fisurar.

Por otro lado, en **figura 144b** se aprecia la evolución del diagrama tensión-abertura de fisura según el porcentaje de sustitución. Solamente se observa una diferencia significativa entre el valor medio obtenido de la abertura de fisura w_d para una sustitución del 35% con el resto de porcentajes.

En cualquier caso, y dado el número de ensayos realizados para cada serie, la variabilidad de los resultados está por encima de las variaciones debidas a la influencia de los FG.



a) Diagrama tensión-deformación.



b) Diagrama tensión-abertura de fisura.

Figura 144. Comportamiento a tracción del HMARF con FG.

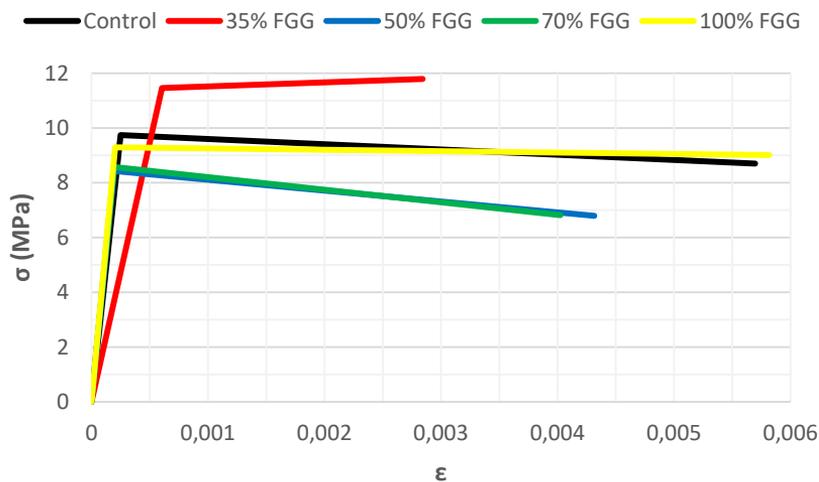
En la **figura 145a** se observa la influencia de los FGG sobre la relación tensión-deformación. Se puede ver que salvo para una sustitución del 35%, no se produce una variación significativa de la deformación que experimenta el HMARF al alcanzar la resistencia a fisuración, obteniendo en todos los casos unos valores de la deformación próximos al 0,2%. Para el 35% esta deformación es del 0,6 %. En cuanto a la tensión de fisuración, salvo para el 35% de sustitución, se observa una reducción que varía



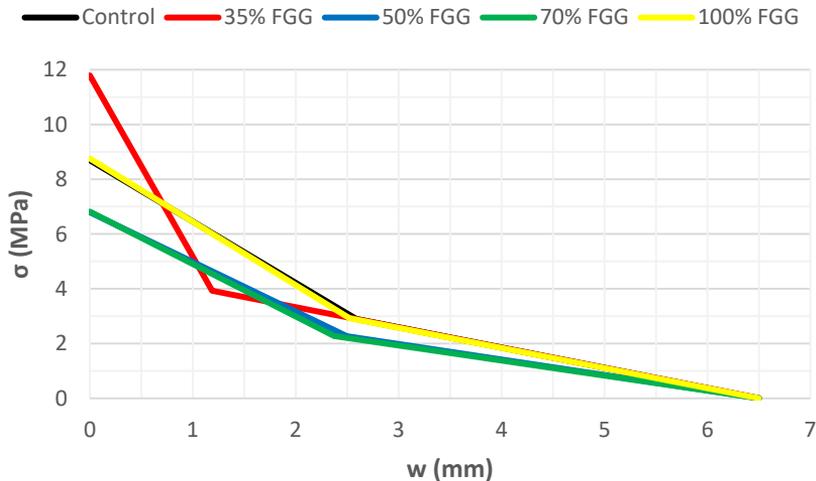
entre el 5% y el 22%. En cuando a los valores de deformación máxima que experimenta el HMARF con FGG cuando se alcanza la tensión última a tracción varía mucho en función del porcentaje de sustitución. Salvo para el 100%, donde la deformación máxima es ligeramente superior a la del HMARF de control (5,8‰), se aprecia una menor deformación en el HMARF cuando se alcanza la tensión última a tracción. Estos valores varían entre el 3‰ y el 5‰. Por último, se aprecia que excepto para el 35%, los valores de la resistencia última a tracción del HMARF, para cada nivel de sustitución, son inferiores a los valores de resistencia a fisuración. Como se ha comentado anteriormente, esto implica un comportamiento post-rotura con reblandecimiento del HMARF.

En la **figura 145b** se muestra la evolución de la tensión y la abertura de fisura según el porcentaje de FGG. Para una sustitución del 35% la w_d apenas es de 1,19 mm con un nivel de tensión ligeramente superior al resto, mientras que para el hormigón de referencia y el resto de porcentajes de sustitución presenta valores próximos a 2,3 mm para niveles de tensión muy similares.

En cualquier caso y dado el número de ensayos realizados para cada serie la variabilidad de los resultados está por encima de las variaciones debidas a la influencia de los FGG.



a) Diagrama tensión-deformación.

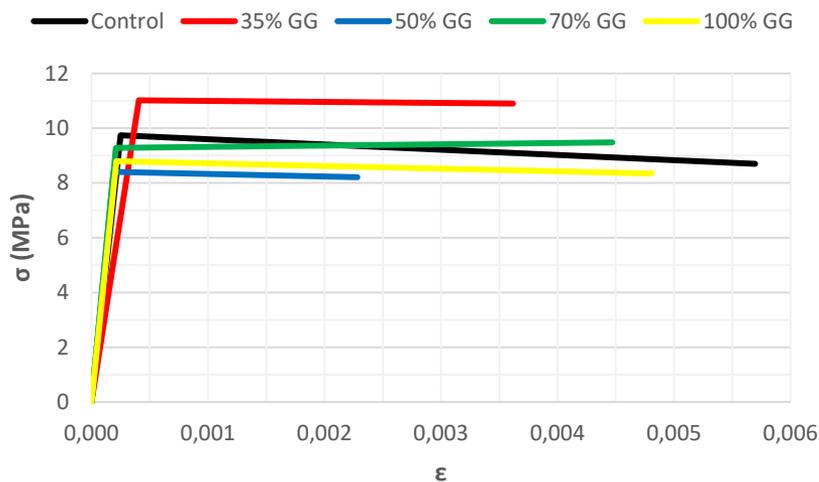


b) Diagrama tensión-abertura de fisura.

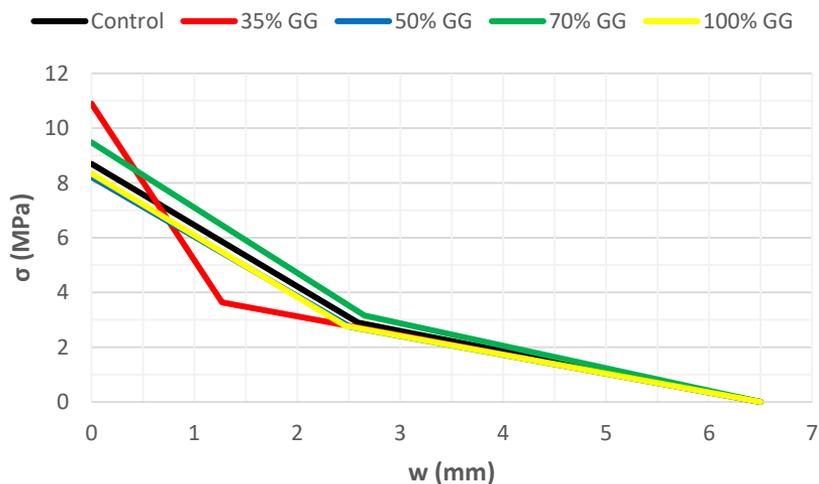
Figura 145. Comportamiento a tracción del HMARF con FGG.

En la **figura 146a** se muestra la influencia que tienen los GG sobre el comportamiento a tracción del HMARF. Por norma general, se puede ver que la deformación que experimenta el HMARF con GG cuando aparecen las primeras fisuras es prácticamente igual para los diferentes porcentajes de sustitución. Esta deformación es aproximadamente del 0,25‰, excepto para el 35% que es algo superior, del 0,4‰. En cuanto a la tensión que es capaz de soportar el HMARF hasta la aparición de las primeras fisuras, solo para una sustitución del 35% se aprecia un incremento respecto al HMARF de control. Este valor es de 11 MPa, lo que implica un incremento de la resistencia a fisuración del 13%. Para el resto de porcentajes se aprecia una pérdida de resistencia que varía entre el 5% y el 14%, respecto al HMARF de control. En cuanto a la deformación máxima que experimentan los HMARF con GG, se puede ver que los valores son más bajos del valor medio del HMARF de control. Como se puede ver en la **figura 146a**, las mayores deformaciones que obtuvieron para altos porcentajes de sustitución. Para el 100% la deformación fue del 4,8‰, mientras que para el 70% fue del 4,4‰. Por último, comentar que el valor medio de la tensión última a tracción, para cada porcentaje de sustitución, no difieren mucho de su resistencia a fisuración. Estas variaciones están comprendidas entre un +2% y -5%.

Por otro lado, en la **figura 146b** se muestra la influencia de los GG en el diagrama tensión-abertura de fisura. Salvo para el 35% de sustitución el comportamiento es muy similar. En cualquier caso, la variabilidad de los resultados está por encima de la influencia de la variable analizada.



a) Diagrama tensión-deformación.



b) Diagrama tensión-abertura de fisura.

Figura 146. Comportamiento a tracción del HMARF con GG.

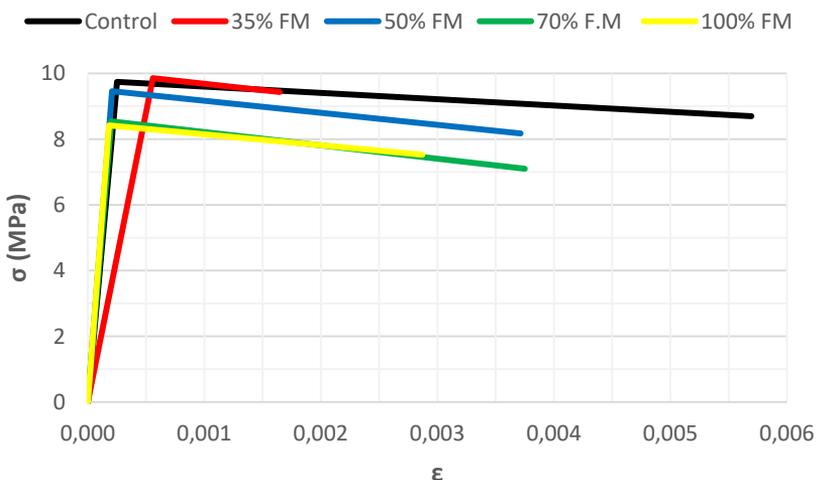
En la **figura 147** se aprecia la influencia de los finos generados durante el proceso de extracción de la fluorita (FM), como sustitutos de la harina de sílice, sobre el comportamiento a tracción del HMARF. Solo para una sustitución del 35% se produce un incremento en la resistencia última media a tracción del HMARF. Este incremento es del 8%. A partir de este nivel de sustitución se observa un descenso de la



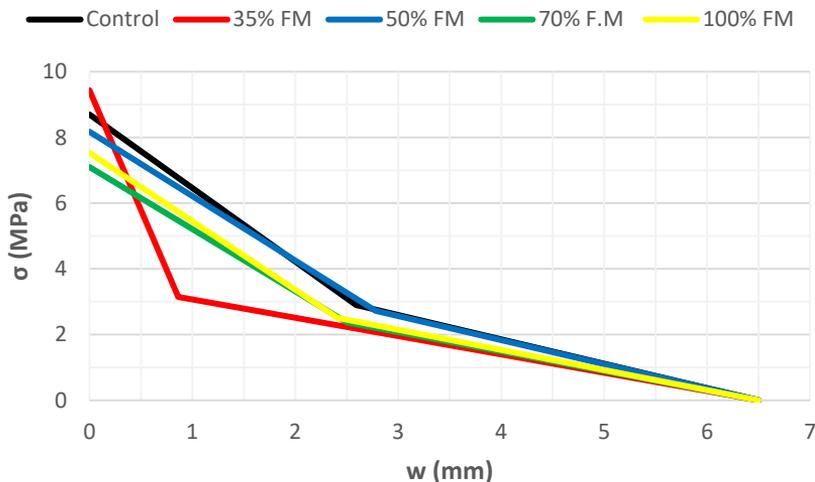
resistencia a medida que se incrementa el contenido de FM. Esta pérdida de resistencia posiblemente esté relacionada con el mayor tamaño de los FM respecto a la harina de sílice, ya que a menor tamaño del árido mayor es la resistencia a tracción que se puede esperar conseguir.

En la **figura 147a** se muestra la influencia de los FM en el diagrama tensión-deformación. Se puede ver que la deformación que experimenta el HMARF con FM, hasta que comienzan a aparecer las primeras fisuras, es similar para todos los niveles de sustitución, aproximadamente del 0,20‰. Solo para el 35% se aprecia una mayor deformación, del 0,56‰. En cuanto a la resistencia a fisuración, en primer lugar se puede ver que la resistencia se reduce a medida que se va incrementando el porcentaje de reemplazo. Solo para el 35% se aprecia un ligero incremento en la tensión media a fisuración respecto al HMARF de control.

Por otro lado, en la **figura 147b** se observa la influencia de los FM en el diagrama tensión-abertura de fisura que define el comportamiento a tracción del HMARF. Se puede ver que salvo para el 35% FM, el comportamiento es muy similar. Para una sustitución del 35% se observa que la w_d se reduce significativamente respecto al resto. De nuevo, la variabilidad de los resultados obtenidos está por encima de la influencia de la variable analizada.



a) Diagrama tensión-deformación.

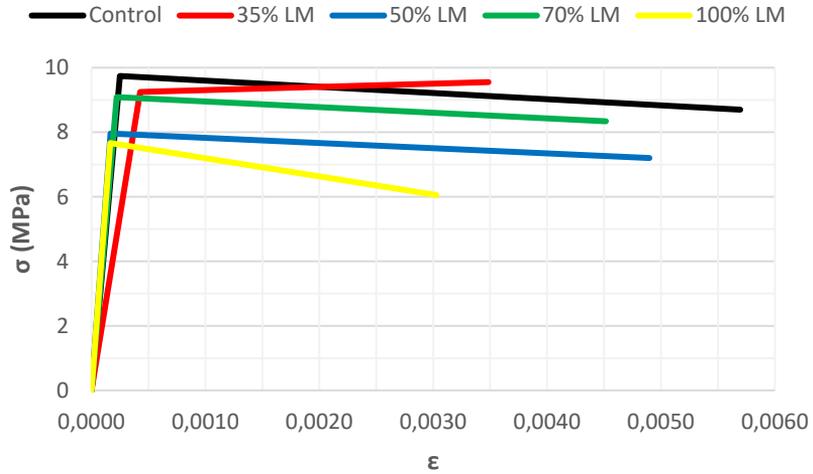


b) Diagrama tensión-abertura de fisura.

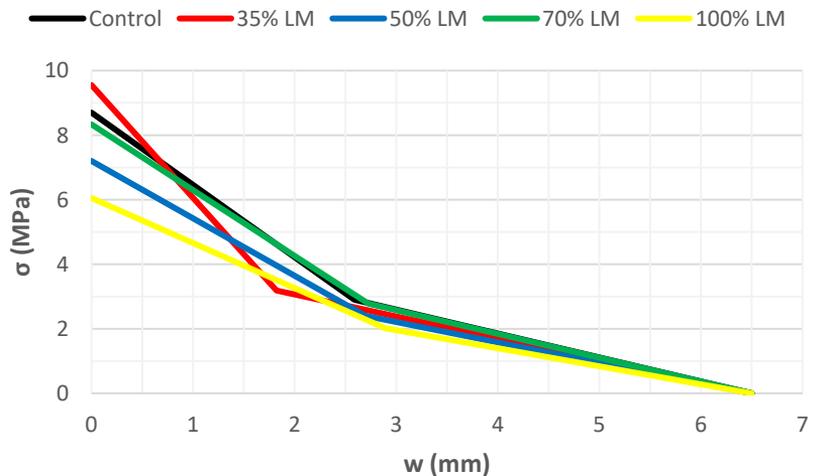
Figura 147. Comportamiento a tracción del HMARF con FM.

En la **figura 148a** se muestra la influencia de la arena LM en la relación tensión-deformación del HMARF. En primer lugar, se aprecia una variación muy pequeña en la deformación que experimentan los HMARF con LM hasta que comienza a fisurar. En cuanto a la resistencia a fisuración, se observa que la adicción de la LM produce una pérdida de resistencia respecto el HMARF de control. Por último, y exceptuando la amasada del 35% LM, se puede ver como una vez alcanzada la tensión de fisuración, la tensión se va reduciendo a medida que la deformación aumenta hasta alcanzar la deformación máxima, momento en el que se produce la rotura.

Por otro lado, en la **figura 148b** se observa que la influencia de la arena LM sobre el diagrama tensión-abertura de fisura es prácticamente inexistente. La variabilidad de los resultados obtenidos está muy por encima de la posible influencia de la arena LM.



a) Diagrama tensión-deformación.



b) Diagrama tensión-abertura de fisura.

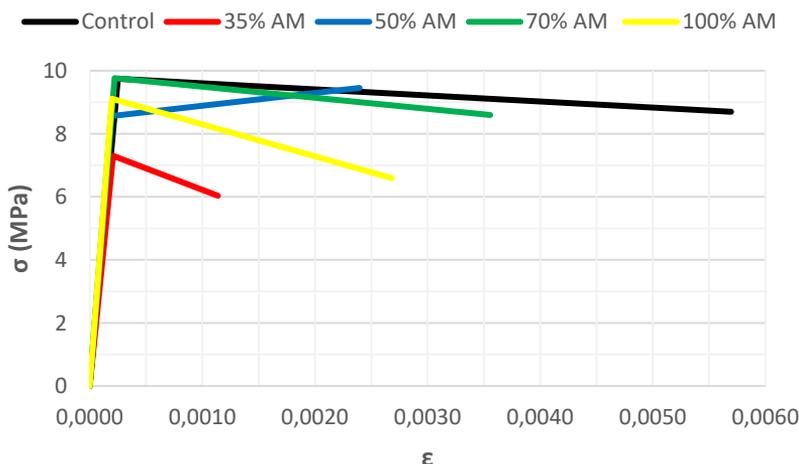
Figura 148. Comportamiento a tracción del HMARF con LM.

En la **figura 149a** se muestra la influencia de la AM sobre el diagrama tensión-deformación. Apenas se aprecia variación en los valores medios de la deformación que experimenta el HMARF con AM. Si se analiza la tensión de fisuración del HMARF, se observa que solo para el 70% el valor medio se asemeja al del HMARF de control. Este valor es del 9,8 MPa. Para el resto de HMARF con AM se aprecia un descenso en la tensión de fisuración, que varía entre el 4% y el 25%, en función del porcentaje de sustitución. En

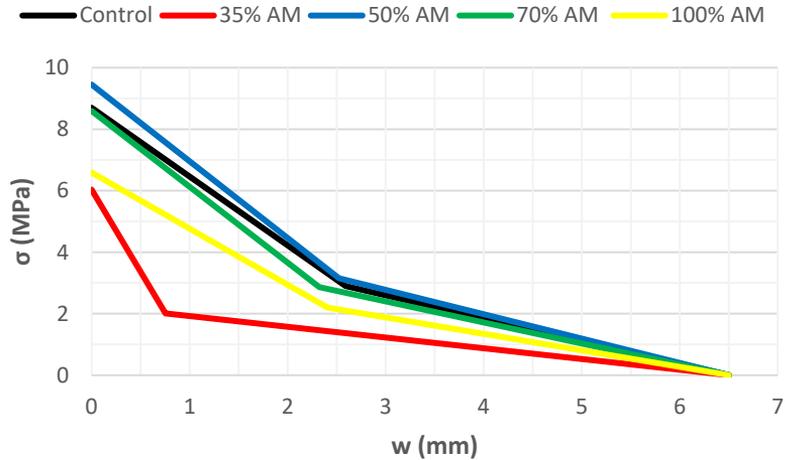


cuanto a la deformación máxima que experimenta el HMARF, y salvo para una sustitución del 70%, no supera el 3,0‰, lo que implica una reducción significativa en la deformación máxima. Por último, se puede ver como una vez que se ha alcanzado la resistencia de fisuración la tensión va decreciendo hasta alcanzar la resistencia última a tracción. Esta pérdida se produce para todos los niveles de reemplazo, salvo para el 50% donde se aprecia un incremento del 10%. En este caso implica un comportamiento post-fisuración con endurecimiento del HMARF.

Por otro lado, en la **figura 149b** se observan los diagramas tensión-abertura de fisura para los distintos niveles de sustitución. La influencia de la AM, salvo en el nivel del 35%, es prácticamente nula. De nuevo se observa que, dado el reducido número de ensayos realizados y a la vista de los resultados obtenidos, la variabilidad de los mismos es superior a la posible influencia de la variable analizada.



a) Diagrama tensión-deformación.



b) Diagrama tensión-abertura de fisura.

Figura 149. Comportamiento a tracción del HMARF con AM.

En la **figura 150** se aprecia la resistencia media a tracción del HMARF correspondiente a todas las amasadas con sustitución de la harina de sílice por finos de granito (FG), finos de granito con granalla (FGG), finos de mina (FM) o finos de los lavaderos de mina (LM) en porcentajes del 35%, del 50%, del 70% y del 100%. Para sustituciones del 35% se aprecia un incremento en la resistencia última a tracción del HMARF respecto al hormigón de control independientemente del tipo de residuo. Para porcentajes de sustitución superiores se mantiene dentro de unos niveles similares a los del hormigón de control. Vemos, pues, que los residuos utilizados en este trabajo no afectan al comportamiento a tracción del HMARF.

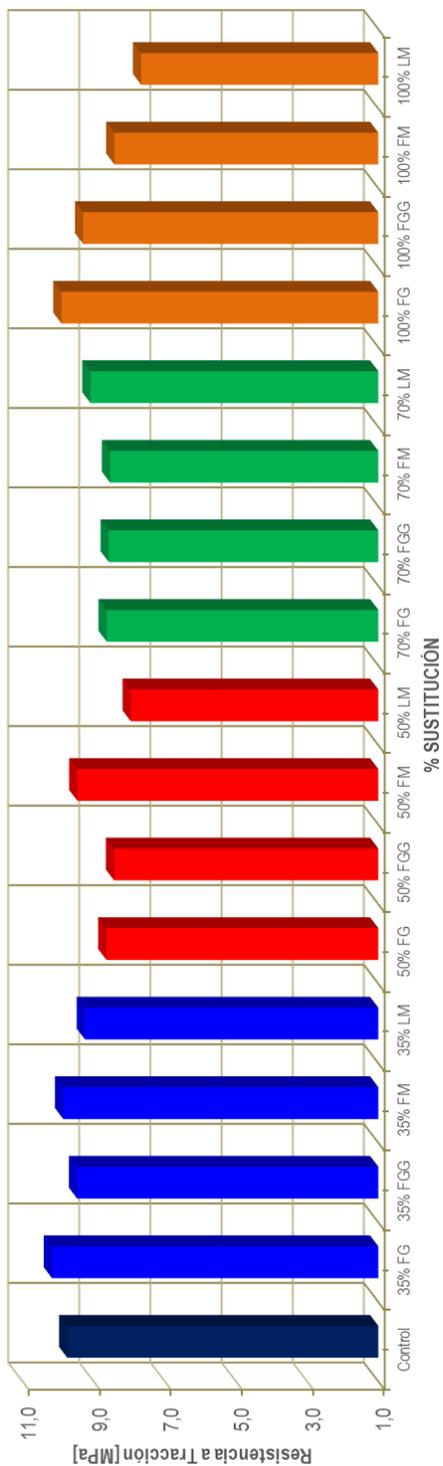


Figura 150. Resistencia a tracción del HIMARF con sustitución de la harina de sílice.



En la **figura 151** se muestra la resistencia a tracción del HMARF, donde se reemplazó la arena 0,5/1,6 mm por gruesos de granito (GG) o la arena 0/0,5 mm por la arena residual de mina 0/0,3 mm (AM). La variabilidad de los resultados obtenidos predomina sobre la influencia de la variable analizada. La utilización de este tipo de residuos no afecta al comportamiento a tracción del HMARF.

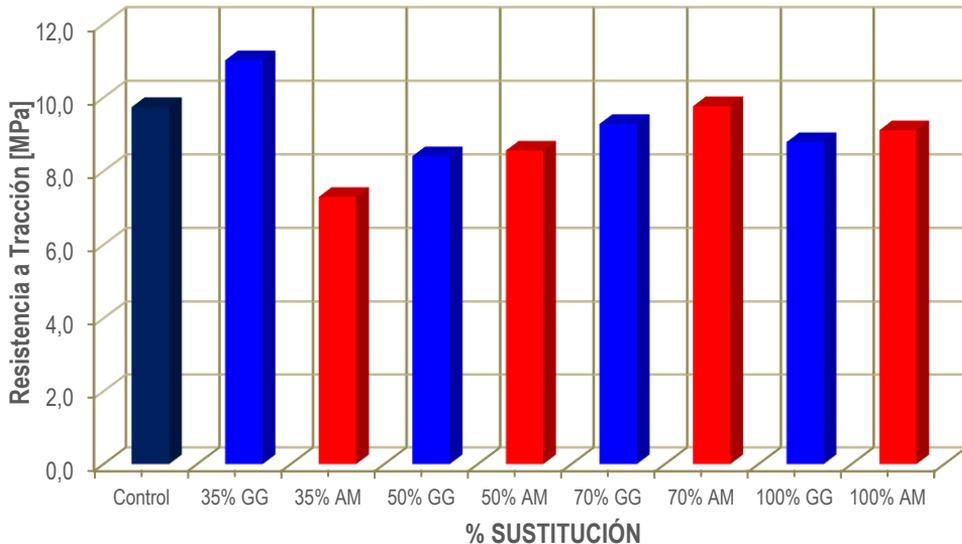


Figura 151. Resistencia a tracción del HMARF con sustitución de la arena silícea.

En resumen, se puede observar una cierta influencia del tipo de residuo sobre la resistencia a tracción del HMARF. No obstante, por norma general, los resultados obtenidos para los diferentes residuos se aproximan bastante a los del hormigón de control. Por otro lado, en cuanto al nivel de reemplazo se puede decir que no tiene influencia en la resistencia a tracción del HMARF ya que dado el reducido número de ensayos realizados y a la vista de los resultados obtenidos, la variabilidad de los mismos es superior a la posible influencia del porcentaje de sustitución.

4.2.8 Análisis de los resultados obtenidos sobre la retracción.

El análisis se ha realizado con los resultados medios obtenidos de medir la variación longitudinal (retracción) que experimentan, durante un periodo de 180 días, dos probetas prismáticas de 285×25×25 mm fabricadas en cada una de las amasadas realizadas.

En la **figura 152** se muestra la variación en la retracción que genera la utilización de los FG procedentes de la cantera de granito, como sustitutos de la harina de sílice. Puede apreciarse que, aunque



todos los hormigones con FG presentan valores de la retracción por debajo del hormigón de control, dichas variaciones no son significativas ya que las diferencias que presentan son muy pequeñas. Por lo tanto, puede establecerse que la utilización de finos de granito como sustitutos de la harina de sílice apenas afecta a la retracción que experimenta el HMARF.

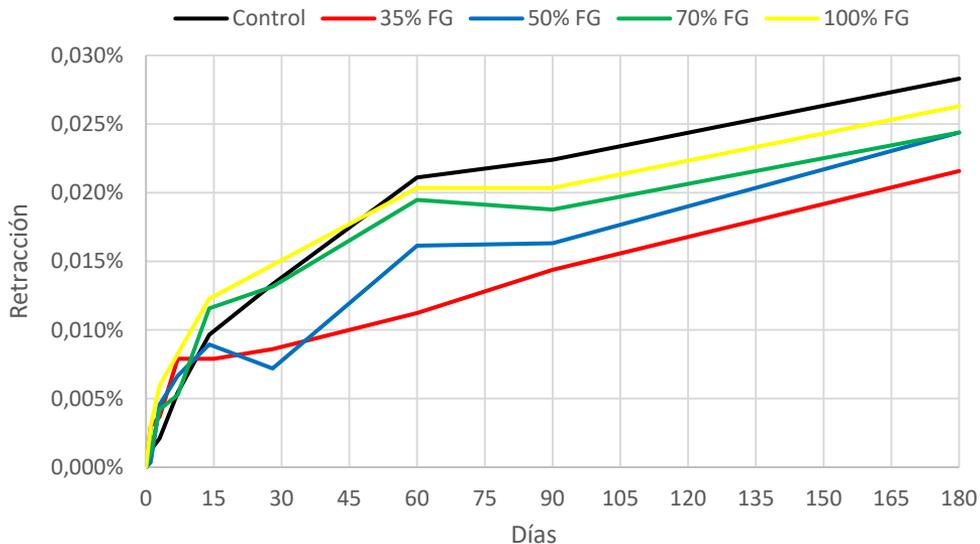


Figura 152. Retracción del HMARF con FG.

En la **figura 153** se muestra la variación en la retracción que genera la utilización de los FGG, como sustituto de la harina de sílice. Se puede ver que la retracción que experimentan los HMARF con FGG es muy similar a la del hormigón de control ya que las variaciones en dichos valores no son significativas. Al igual que en el caso anterior, la utilización de finos de granito con granalla como sustitutos de la harina de sílice no afecta a la retracción del HMARF. Los valores de la retracción varían dentro de una horquilla de valores muy pequeña.

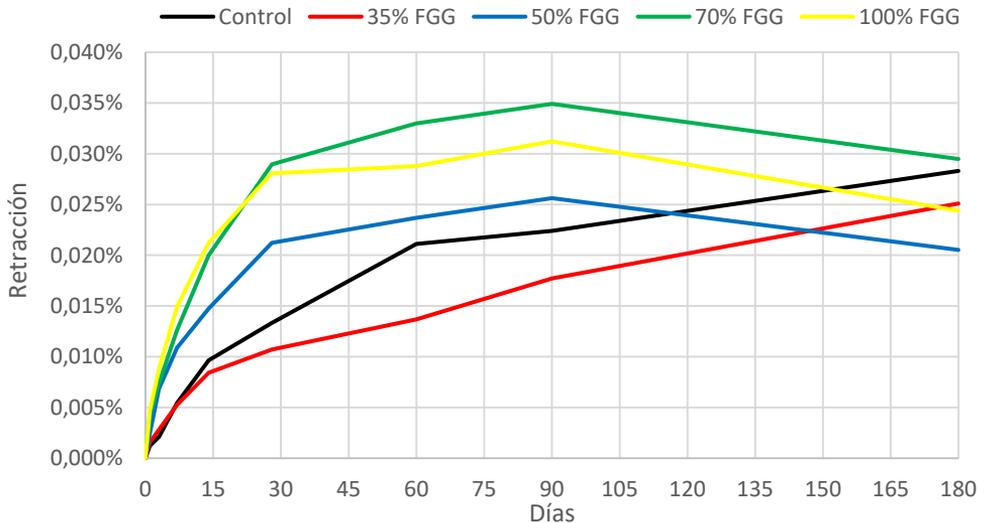


Figura 153. Retracción del HMARF con FGG.

En la **figura 154** se aprecia la variación en la retracción del HMARF que generan los GG cuando se utilizan como sustitutos de la arena 0,5/1,6 mm. Se puede ver que, en general, la retracción de los HMARF con GG es ligeramente inferior a la del HMARF de control pero, como puede apreciarse, no existen diferencias significativas en la retracción del HMARF al utilizar grueso de granito como sustitutos de la arena más gruesa. Todos los valores están comprendidos entre el 0,024% y el 0,028%.

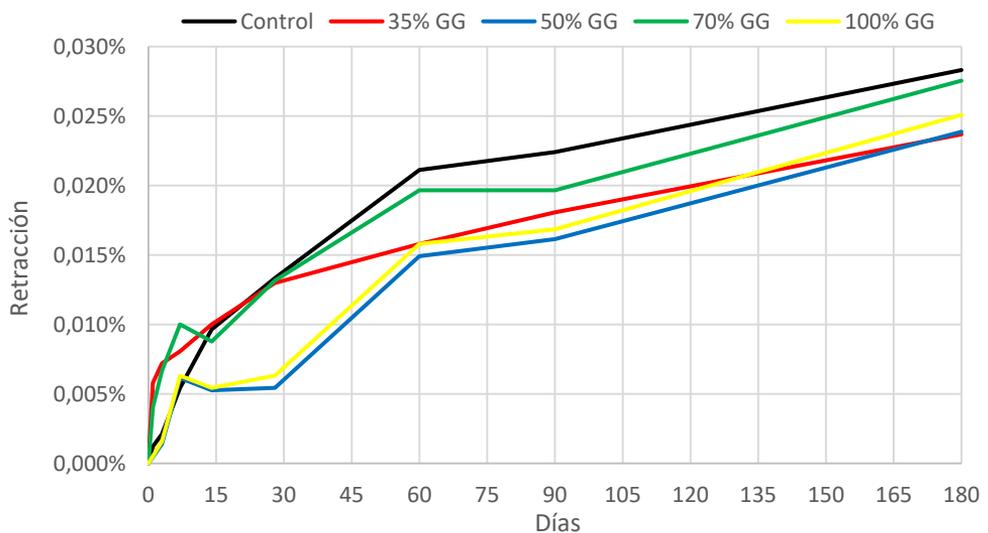


Figura 154. Retracción del HMARF con GG.



En la **figura 155** se puede ver la influencia que tiene la utilización de FM, como sustituto de la harina de sílice, sobre la retracción del HMARF. En primer lugar, se puede ver que para una sustitución de hasta el 70% la retracción que se produce es inferior a la del HMARF de control. Para el 100%, los resultados son prácticamente iguales a los del HMARF de control, sobre todo a partir del segundo mes. No obstante, las variaciones que se producen no son significativas para ningún porcentaje. Por la tanto, puede establecerse que la sustitución de FM por la harina de sílice no afecta a los valores de la retracción del HMARF.

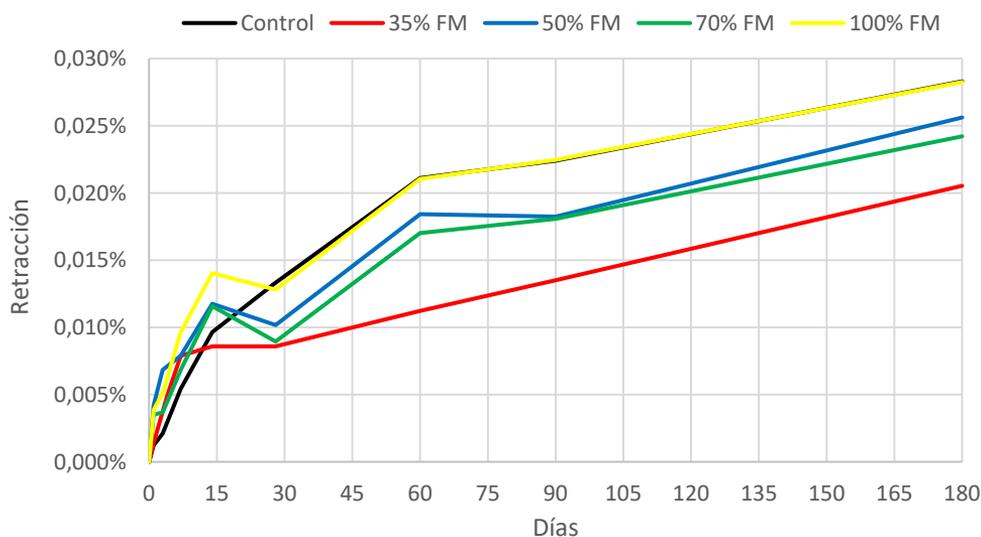


Figura 155. Retracción del HMARF con FM.

En la **figura 156** se observa la variación en la retracción del HMARF cuando se utiliza LM, como sustituto de la harina de sílice. En primer lugar, y al igual que sucede para los FM, la variación en la retracción que experimentan los HMARF con una sustitución del 35%, del 50% y del 70% son ligeramente inferiores a la retracción media del HMARF de control, mientras que para el 100%, los resultados se asemejan a los del HMARF de control. Las diferencias en el porcentaje de retracción final son muy pequeñas estando los valores comprendidos entre el 0,020% y el 0,030%. De nuevo, al igual que en el resto de casos anteriores, las variaciones que se producen no son significativas para ningún porcentaje. Por la tanto, puede establecerse que la sustitución de LM por la harina de sílice apenas afecta a los valores de la retracción del HMARF.

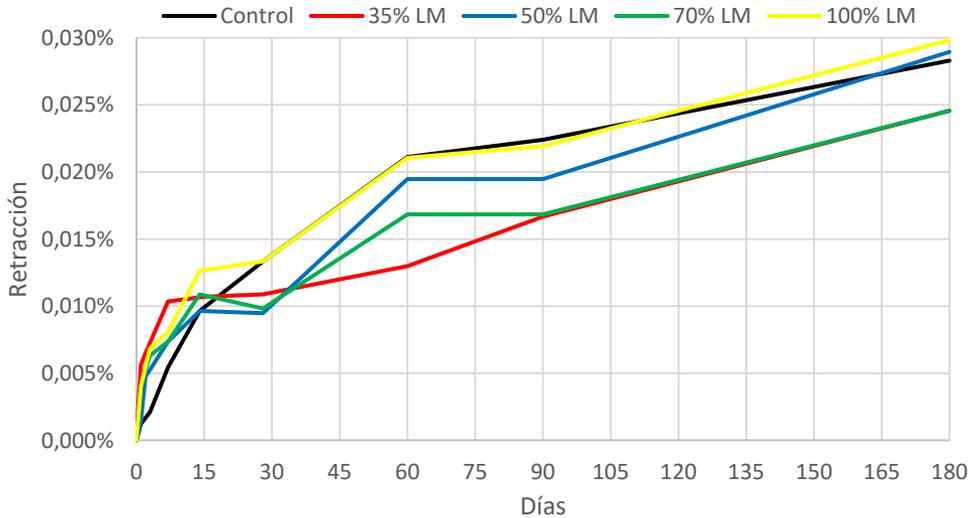


Figura 156. Retracción del HMARF con LM.

En la **figura 157** se muestra la influencia que tiene la utilización de AM, como reemplazo de la arena 0/0,5 mm, sobre la variación en la retracción del HMARF. Los valores obtenidos para el 35%, 70% y 100%, durante los seis meses que ha durado el ensayo, son ligeramente inferiores a los del hormigón de control, mientras que para el 50% fueron algo superiores. No obstante, en ningún caso la variación es superior al 0,010% y, por lo tanto, dichas variaciones no son significativas. Puede establecerse que la sustitución de AM por la harina de sílice tampoco afecta a los valores de la retracción del HMARF.

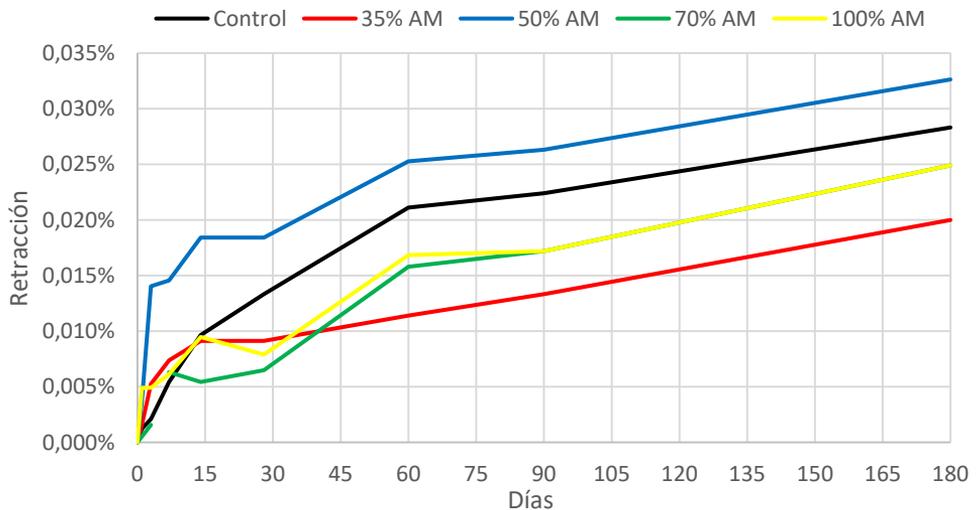


Figura 157. Retracción del HMARF con AM.



A la vista de los resultados obtenidos se puede apreciar que las variaciones que se producen en la retracción del HMARF son muy pequeñas, independientemente del tipo de residuo y del nivel de sustitución. Todos los valores finales de la retracción están entre el 0,020% y el 0,033%. Además, la retracción que experimentan los HMARF con residuos industriales es menor o prácticamente igual a la del HMARF de control. Por tanto, se puede decir que la utilización de estos residuos no influye en la retracción del HMARF. Estos resultados están en la línea de los resultados obtenidos por Ghafari [27], Van Tuan [63] y Wang [43].



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1 CONCLUSIONES.

En este estudio se ha analizado la influencia que tiene la utilización de diferentes tipos de residuos mineros como reemplazo, parcial o total, de los áridos naturales. Se han analizado seis tipos de residuos industriales procedentes de dos localizaciones diferentes y cuatro niveles de sustitución (35%, 50%, 70% y 100%).

El campo de validez de las conclusiones obtenidas debe considerarse limitado al margen en el que se mueven los parámetros considerados. Las sustituciones se han realizado teniendo en cuenta la cantidad de finos, el tamaño de partícula y la composición química de los materiales.

Los residuos utilizados en este estudio han sido, por un lado, tres tipos distintos procedentes de una cantera de granito situada en la provincia de Pontevedra y, por otro lado, tres residuos procedentes de los lavaderos de una mina de fluorita situada en Asturias.

Como resumen del análisis de resultados llevado a cabo y de los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio, a continuación, se exponen las conclusiones obtenidas en el mismo.



5.1.1 Sobre las propiedades analizadas.

Consistencia del HMARF.

La utilización de cualquiera de los residuos empleados en este trabajo influye en mayor o menor medida sobre la trabajabilidad del HMARF. Salvo para el HMARF con FGG, se aprecia una mejora en la trabajabilidad del HMARF. La reducción que se produce para el HMARF con FGG puede estar influenciada por la presencia de partículas metálicas y la presencia del floculante en los FGG. Esto último puede provocar una mayor demanda de agua y, por tanto, una reducción del agua efectiva y la consiguiente pérdida de trabajabilidad.

En el caso del HMARF con residuos procedentes de la mina de fluorita (FM, LM y AM) el porcentaje de sustitución y el tipo de residuo apenas tienen influencia sobre la trabajabilidad del HMARF. Solo para un nivel de sustitución del 35% se aprecia una mayor diferencia en los resultados obtenidos. Sin embargo, esta variación puede ser debida al cambio en el tipo de humo de sílice densificado empleado.

Para los HMARF con residuos procedentes de las canteras de granito (FG, FGG y GG) los resultados obtenidos muestran una influencia tanto del tipo de residuo como del porcentaje de sustitución.

Densidad del HMARF endurecido.

La procedencia de los residuos tiene una ligera influencia sobre la densidad del HMARF endurecido. Los HMARF con residuos procedentes de la mina de fluorita (FM, LM y AM) presentan unos valores ligeramente más bajos a los de los HMARF con residuos procedentes de la cantera de granito (FG, FGG y GG). No obstante, las diferencias entre ambos tipos de residuos no son significativas, inferiores al 7%.

Si los resultados se comparan con el valor medio del HMARF de control, salvo para los FGG, se puede decir que el porcentaje de sustitución, el tipo de residuo y su procedencia apenas tienen influencia en la densidad. Las variaciones que se producen respecto al HMARF de control son inferiores al 3% y están dentro de los márgenes de error del ensayo. Por tanto, se puede decir que para los HMARF con residuos mineros la variabilidad de los resultados prevalece sobre la posible influencia de estos residuos sobre la densidad del HMARF:

Los mayores valores obtenidos en el HMARF con FGG, respecto al resto de amasadas, posiblemente sean debidos a la presencia de partículas metálicas.



Absorción de agua del HMARF endurecido.

Los resultados de absorción del agua obtenidos en este trabajo indican que la utilización de estos residuos no influye sobre la permeabilidad del HMARF. Los valores obtenidos son muy bajos, la mayor absorción es del 0,60% para el 70% de LM. La variabilidad de ésta propiedad en sí misma está por encima los efectos de las variables analizadas.

Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión del HMARF se ve influenciada, en mayor o menor medida, tanto por la procedencia como por el tipo de residuo empleado. La utilización de cualquiera de los seis tipos de residuos produce un incremento de la resistencia a compresión del HMARF a los 28 días, respecto al hormigón de control. Además, para el mismo porcentaje de sustitución y tipo de árido a sustituir los valores medios obtenidos en los HMARF fabricados con residuos de granito son más altos. Los mejores resultados se obtienen para el 35% de GG con un incremento de la resistencia a compresión del 21% respecto al hormigón de control.

En cuanto al porcentaje de sustitución, se puede considerar que para cada tipo de residuo no repercute de manera significativa sobre la resistencia a compresión del HMARF. Además, a partir del 50%, se puede decir que el porcentaje no tiene influencia sobre la resistencia media a compresión, ya que las variaciones son muy pequeñas y se encuentran dentro de los márgenes de error propios del ensayo.

Para los HMARF fabricados con residuos de granito (FG, FGG y GG) no se observa una variación significativa en los valores de resistencia media a compresión obtenidos en función del tipo de residuo utilizado y del árido reemplazado (arena silícea gruesa o harina de sílice). Sin embargo, en el caso de los residuos de la mina de fluorita (FM, LM y AM) se observa que la resistencia a compresión se ve influenciada tanto por el tipo de residuo como por el árido natural que se reemplaza. Los mejores resultados se obtienen cuando se sustituye la arena silícea por AM.

Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad del HMARF apenas se ve influenciado por el empleo de alguno de los seis tipos de residuo utilizados en este estudio. La utilización de cualquiera de los residuos produce un ligero descenso en el valor del módulo de elasticidad del HMARF, mientras que el porcentaje de sustitución para



cada residuo no tiene influencia alguna, ya que, aunque existen ligeras variaciones, estas son consecuencia de la variabilidad de estos hormigones.

Para los HMARF fabricados con residuos de la mina de fluorita (FM, LM y AM) las variaciones son inferiores al 11%. Solo para el 35% de FM y 35% de LM se aprecia un mayor descenso en el módulo de elasticidad, del 16,5% y 15,5%, respectivamente. Sin embargo, esto puede ser consecuencia de la utilización de un tipo de humo de sílice diferente en estas amasadas. En el caso de los residuos procedentes de la cantera de granito (FG, FGG y GG), se observa que la utilización de FG no tiene influencia alguna sobre el módulo de elasticidad del HMARF, mientras que para los FGG y GG se aprecia un ligero descenso, inferior al 8,5%.

Resistencia a flexión.

La resistencia flexión del HMARF reciclado muestra una gran dispersión de resultados. Se observaron aumentos de hasta el 11,50% y descensos del 28%.

A la vista de los valores obtenidos, el lugar de procedencia es el factor que mayor influencia tiene sobre la resistencia a flexión del HMARF. Con la utilización de residuos procedentes de la cantera de granito (FG, FGG y GG) se obtienen unos altos valores de resistencia a flexión, comparables a los del HMARF de control. Sin embargo, en los HMARF fabricados con residuos procedentes de la mina de fluorita (FM, LM y AM) se aprecia una pérdida de resistencia a flexión. En cuanto al nivel de sustitución y teniendo en cuenta la variabilidad de los resultados obtenidos para cada serie de ensayos, se puede decir, que el porcentaje de sustitución no influye de manera significativa en el valor de la resistencia a flexión del hormigón.

Los buenos resultados obtenidos en los HMARF con residuos de granito son, posiblemente, consecuencia de una mejor adherencia con la pasta de cemento debido a la forma irregular y angulosa de las partículas de granito. Los peores resultados se obtienen cuando se realiza una sustitución del 50% de cualquiera de los residuos de granito. Esta caída en la resistencia en las amasadas del 50% puede ser debida al reducido número de ensayos por amasada o a ligeras modificaciones durante el procedimiento de amasado y fabricación. Por tanto, sería muy conveniente volver a repetir dichas amasadas, ya que si se prescinde de ellas se observa que la resistencia sigue una tendencia ligeramente decreciente al aumentar el porcentaje de sustitución.



En el caso de los HMARF fabricados con residuos procedentes de la mina de fluorita se aprecia una pérdida de resistencia a flexión, independientemente del porcentaje de sustitución y del árido natural que se esté sustituyendo. Estas pérdidas de resistencia se hacen más evidentes para un reemplazo del 100%. Los peores resultados se obtienen para el 100% de LM donde se produce una pérdida de resistencia del 28%.

Cuando se realiza una sustitución de la harina de sílice del HMARF se aprecia que tanto el tamaño de partícula como la cantidad de finos son las variables que mayor influyen sobre resistencia a flexión del HMARF. La utilización de residuos con un mayor tamaño de partícula y una menor cantidad de finos repercute negativamente sobre la resistencia a flexión.

Por último, los resultados de la resistencia a flexión obtenidos en este estudio muestran una alta variabilidad. Posiblemente sea consecuencia de la corta experiencia en la fabricación de esta clase de hormigón. Debido a esta circunstancia se han podido originar ligeras modificaciones durante el procedimiento de amasado y fabricación, a pesar de la aparente rigurosidad llevada a cabo, que hayan sido las causantes de dichas variaciones. Otro factor que ha podido influir es el número de ensayos realizados por amasada.

Comportamiento a tracción.

La utilización de residuos mineros como sustitutos de las arenas naturales (harina de sílice y arena silícea) apenas tiene influencia en el comportamiento a tracción salvo, para el 35%, donde se aprecia un ligero incremento en la resistencia. Los valores obtenidos se mantienen dentro de unos niveles similares a los del hormigón de control. Aunque hay ciertas variaciones para los diferentes residuos y porcentajes de sustitución se puede decir que la variabilidad de los resultados obtenidos predomina sobre la influencia de la variable analizada.

En cuanto al comportamiento post-fisuración del HMARF, se puede decir que el tipo de residuo y el porcentaje de sustitución no influyen sobre esta variable. Casi todos los hormigones con residuos mineros y el hormigón de control presentan un reblandecimiento después de la fisuración. Solo para algunas amasadas con residuos de la cantera de granito se produce un endurecimiento del hormigón una vez alcanzada la tensión de fisuración. Estas variaciones posiblemente sean debidas a las variaciones ya comentadas durante el proceso de amasado y fabricación.



La deformación que experimenta el HMARF con residuos mineros hasta alcanzar la tensión de fisuración tampoco se ve afectada ni por el tipo de residuo ni por el porcentaje de sustitución. La mayor deformación en las amasadas del 35% posiblemente sea consecuencia del tipo de humo de sílice empleado. Esta circunstancia ha podido originar una mayor deformabilidad inicial en el hormigón.

En los HMARF fabricados en este estudio el porcentaje de sustitución y el tipo de residuo no influyen de manera significativa sobre la resistencia última a tracción. Solo para el caso de los residuos procedentes de la mina de fluorita (FM, LM y AM) y para una sustitución del 100% se aprecia una reducción en la resistencia (alcanzando unos valores superiores al 13%). En cualquier caso, dado el número reducido de ensayos realizados para cada serie, la variabilidad de los resultados obtenidos está por encima de la influencia de la variable analizada.

La deformación máxima del HMARF se ve afectada, en mayor o menor medida, por el tipo de residuo. Por lo general, la deformación que experimentan los HMARF con residuos es inferior a la del hormigón de control. En cambio, debido al reducido número de ensayos realizados para cada serie, el porcentaje de sustitución apenas tiene influencia. En este caso, la variabilidad de los resultados está por encima de las variaciones debidas a la influencia del porcentaje de sustitución.

El análisis realizado sobre el comportamiento a tracción del HMARF muestra que ni el tipo de residuo ni el porcentaje de sustitución influyen sobre la abertura de fisura a un tercio de la carga máxima. La variabilidad de los resultados obtenidos está por encima de los efectos de las variables analizadas. Solo para un nivel de sustitución del 35% se observe una reducción en el tamaño de abertura de la fisura.

Retracción.

La retracción del HMARF no se ve afectada por la utilización de ninguno de los residuos utilizados en este trabajo. Las variaciones que se producen en la retracción del HMARF son muy pequeñas, independientemente del tipo de residuo y del nivel de sustitución. Todos los valores están comprendidos entre el 0,020% y el 0,033%.

5.1.2 Sobre los factores analizados.

Los factores que se han tenido en cuenta en este trabajo para analizar la influencia de los residuos mineros incorporados en la fabricación de HMARF han sido, principalmente, la procedencia del residuo, el tipo de residuo, el porcentaje de sustitución y el árido natural sustituido. Los resultados obtenidos muestran



que el tipo de residuo y su procedencia son los factores que mayor influencia tienen sobre las propiedades de HMARF. Los mejores resultados se obtienen para los residuos procedentes de la cantera de granito (FG, FGG y GG).

El porcentaje de sustitución es un factor que en porcentajes no muy elevados prácticamente no influye sobre las propiedades del HMARF. Aunque existen ciertas variaciones, estas posiblemente sean consecuencia de la variabilidad en los resultados obtenidos y no de la variable analizada. Solo cuando se alcanza el nivel de sustitución del 100% se observa una influencia clara del porcentaje sustituido.

El tipo de árido a sustituir es otro factor que prácticamente no influye sobre las propiedades analizadas en este trabajo. No obstante, cuando se sustituye alguna de las fracciones de la arena silícea (0/0,5 mm o 0,5/1,6 mm) los resultados obtenidos son mejores.

Por otro lado, en este estudio se ha puesto de manifiesto que factores como el tamaño de partículas, la cantidad de finos, la granulometría del humo de sílice densificado y el tipo de amasadora pueden influir en ciertas propiedades del HMARF endurecido. Por este motivo, sería conveniente seguir profundizando en dicho estudio.

5.1.3 Consideraciones generales.

Según los resultados obtenidos en este trabajo, se puede establecer que los residuos procedentes de las canteras de granito y de las minas de fluorita son una alternativa viable para la fabricación de un HMARF más sostenible como sustitutos de los áridos naturales. Hay que destacar que también se conseguiría una mayor reutilización de los residuos mineros y una reducción en la sobreexplotación de los áridos naturales.

5.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Sería conveniente profundizar más en este estudio ampliando la batería de ensayos en cada serie de amasadas. Para reducir considerablemente la variabilidad en los resultados podría incrementarse como mínimo a 6 el número de ensayos para cada propiedad en cada una de las amasadas.

Mejorar la metodología de fabricación de este tipo de hormigones, estableciendo un procedimiento base muy riguroso ya que, a pesar de la rigurosidad con la que se lleva a cabo su fabricación, cualquier ligera variación en el proceso de amasado o fabricación puede originar variaciones en los resultados.



Además, sería conveniente establecer un procedimiento que garantice una distribución lo más uniforme posible de las fibras de acero durante la fabricación de las probetas de HMARF.

En los ensayos de flexotracción, utilizar un segundo captador para poder medir las variaciones en la flecha en las dos caras de la probeta que se está ensayado con el fin de descartar posibles anomalías que se produzcan durante la realización del propio ensayo.

Profundizar en el estudio y analizar la viabilidad de mezclar varios tipos de residuos mineros con el objetivo de aumentar el porcentaje total de árido a reemplazar.

Evaluar los posibles tratamientos que necesitarían estos residuos con el fin de mejorar su empleo en la dosificación de HMARF.

Profundizar en el estudio de otros factores que puedan influir en las propiedades del HMARF con residuos mineros como el tamaño de partículas, la cantidad de finos, la granulometría del humo de sílice densificado y el tipo de amasadora. Análisis del comportamiento estructural a escala real de vigas y pilares fabricados con HMARF. Establecer los requisitos necesarios que permitan incorporar de manera satisfactoria esta clase de residuos en estructuras construidas con HMARF.

Analizar el grado de sostenibilidad que se puede llegar alcanzar con la reutilización de este tipo de residuos en la fabricación de HMARF.



CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet' Text with EEA relevance.
2. N. Randl, T.Steiner, S.Ofner, E.Baumgartner, T.Mészöly. "Development of UHPC mixtures from an ecological point of view". Construction and Building Materials, 67, pp. 373-378. 2014.
3. Estadísticas sobre residuos - Statistics Explained. 2018.
http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/es.
4. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. 2018.
<https://www.boe.es/boe/dias/2011/07/29/pdfs/BOE-A-2011-13046.pdf>.
5. Estadísticas sobre la recogida y tratamiento de residuos. Encuesta sobre generación de residuos en la industria. 2014. <http://www.ine.es/prensa/np1004.pdf>.
6. Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras. 2018. <http://www.boe.es/boe/dias/2009/06/13/pdfs/BOE-A-2009-9841.pdf>.



7. Residuos mineros. 2018. <https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/mineros/Que-aplicaciones-tienen-materiales-reciclados.aspx>.
8. EHE 08, Instrucción del hormigón estructural, España, 2008.
9. T. Man-Chung. "High performance concrete—past, present and future". Proceedings of the International Symposium on UHPC, Kassel, Germany, pp: 3-9. 2004
10. Association Française de Génie Civil (AFGC); Service D'études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). "Ultra high performance fibre-reinforced concretes interim recommendations". SETRA-AFGC, Paris, France, 2002.
11. Federal Highway Administration. "Ultra-high performance concrete: A State of the art report for the bridge community". vol. FHWA-HRT-13-060. June 2013.
12. P. Richard. "Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength". M. Cheyreyz (Editor), ACI SPI144-24, pp: 507-518. 1994
13. F. De Larrard and T. Sedran. "Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model". Cement and Concrete Research, 6, pp: 997-1009. 1994.
14. R. Jacques. "First recommendations for Ultra-High-Performance Concretes and examples of application". Proceeding of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, pp: 79-90. 2004.
15. M. Schmidt. "Sustainable building with UHPC coordinated research program in germany". Proceedings of hipermat 2012. 3rd International Symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials, Schmidt, C. Glotzbach, S. Fröhlich, S. Piotrowski (Editor), Kassel, Germany, pp: 17-25. 2012.
16. EHE 08, Instrucción del hormigón estructural, España, 2008.
17. M. Fernandez Cánovas. "Hormigón". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. 2013.
18. N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou. "Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC". Construction and Building Materials 145, pp: 243-252. 2017



19. B. Zegardlo, M. Szelag and P. Ogrodnik. "Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes - the method of production and the interfacial transition zone". *Construction and Building Materials* 122, pp:736-742. 2016.
20. K. S. Al-Jabri, M. Hisada, A. H. Al-Saidy and S. K. Al-Oraimi. "Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate". *Construction and Building Materials* 23, no. 6, pp: 2132-2140. 2009.
21. Z. G. Zhu, B. X. Li and M. K. Zhou. "The influences of iron ore tailings as fine aggregate on the strength of ultra-high performance concrete". *Advances in Materials Science and Engineering*, 6. 2015.
22. S. Pyo and H. K. Kim. "Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder". *Construction and Building Materials* 131, pp: 459-466. 2017.
23. R. Yu, P. Spiesz and H. J. H. Brouwers. "Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses". *Cement & Concrete Composites* 55, pp: 383-394. 2015.
24. W. Huang, H. Kazemi-Kamyab, W. Sun and K. Scrivener. "Effect of replacement of silica fume with calcined clay on the hydration and microstructural development of eco-UHPFRC". *Materials & Design* 121, pp:36-46. 2017.
25. World Commission on Environment and Development. "Our common future (Brundtland report)". WCED, 1987.
26. Z. M. Wu, C. J. Shi and W. He. "Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes". *Construction and Building Materials* 136, pp: 307-313. 2017.
27. E. Ghafari, S. A. Ghahari, H. Costa, E. Julio, A. Portugal and L. Duraes. "Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of Ultra-High Performance Concrete". *Construction and Building Materials* 127, pp:43-48. 2016.



28. B. Skariah Thomas. "Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3, pp: 3913-3923. 2018.
29. C. J. Shi, Z. M. Wu, J. F. Xiao, D. H. Wang, Z. Y. Huang and Z. Fang. "A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design". *Construction and Building Materials* 101, pp: 741-751. 2015.
30. F. De Larrard. "Concrete mixture proportioning: A scientific approach". E&FN SPON. London, 1999.
31. B. A. Graybeal. "Material property characterization of Ultra-High Performance Concrete". FHWA, U.S. Department of Transportation, McLean, VA. 2006.
32. M. Schmidt and E. Fehling. "Ultra-High-Performance Concrete: Research, development and application in Europe". 7th International Symposium on the utilization of High-Strength and High Performance Concrete, ACI (Editor), vol. SP-228-4, Washington, pp. 51-78. 2005.
33. Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). España, 2016.
34. M. B. Eide and J.-M. Hisdal. "Ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) – State of the art". Consortium Concrete Innovation Centre (COIN). 2012.
35. J. Liu, F. Y. Han, G. Cui, Q. Q. Zhang, J. Lv, L. H. Zhang and Z. Q. Yang. "Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete". *Construction and Building Materials* 121, pp:310-318. 2016.
36. J. Ma, M. Orgass, F. Dehn, D. Schmidt and N. V. Tue. "Comparative investigations on ultrahigh performance concrete with and without coarse aggregates". *Proceeding of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, Germany, pp: 205-212. 2004.
37. A. Gonzalez-Corominas and M. Etxeberria. "Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates". *Construction and Building Materials* 68, pp: 618-626. 2014.
38. S. J. Zhao, J. J. Fan and W. Sun. "Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete". *Construction and Building Materials* 50, pp: 540-548. 2014.



39. C. Q. Lye, S. K. Koh, R. Mangabhai and R. K. Dhir. "Use of copper slag and washed copper slag as sand in concrete: A state-of-the-art review". Magazine of Concrete Research 67, no. 12, pp: 665-679. 2015.
40. P. S. Ambily, C. Umarani, K. Ravisankar, P. R. Prem, B. H. Bharatkumar and N. R. Iyer. "Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate". Construction and Building Materials 77, pp: 233-240. 2015.
41. S. L. Yang, S. G. Millard, M. N. Soutsos, S. J. Barnett and T. T. Le. "Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)". Construction and Building Materials 23, no. 6, pp: 2291-2298. 2009.
42. H. Kim, T. Koh and S. Pyo. "Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags". Construction and Building Materials 123, pp: 153-160. 2016
43. X. P. Wang, R. Yu, Z. H. Shui, Q. L. Song and Z. H. Zhang. "Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly ultra-high performance concrete incorporating recycled coral based materials". Journal of Cleaner Production 165, pp: 70-80. 2017.
44. S. C. Kou and F. Xing. "The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fibre-reinforced ultrahigh performance concrete". Advances in Materials Science and Engineering, pp: 8. 2012.
45. Z. M. Wu, C. J. Shi and K. H. Khayat. "Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC)". Cement & Concrete Composites 71, pp: 97-109. 2016.
46. Z. Q. Li, H. K. Venkata and P. R. Rangaraju. "Influence of silica flour-silica fume combination on the properties of high performance cementitious mixtures at ambient temperature curing". Construction and Building Materials 100, pp: 225-233. 2015.
47. Q. Ye, Z. N. Zhang, D. Y. Kong and R. S. Chen. "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume". Construction and Building Materials 21, no. 3, pp: 539-545. 2007.



48. J. F. Burroughs, J. Shannon, T. S. Rushing, K. Yi, Q. B. Gutierrez and D. W. Harrelson. "Potential of finely ground limestone powder to benefit ultra-high performance concrete mixtures." *Construction and Building Materials* 141, pp: 335-342. 2017.
49. ASTM C618-05. "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete." 2005.
50. UNE-EN 197-1. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cemento comunes". 2000.
51. I. Ferdosian, A. Camoes and M. Ribeiro. "High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete (UHPC)". *Ciencia & Tecnologia Dos Materiais* 29, no. 1, pp: E157-E161. 2017.
52. C. Yalcinkaya and H. Yazici. "Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures". *Construction and Building Materials* 144, pp: 252-259. 2017.
53. H. Yazici, M. Y. Yardimci, S. Aydin and A. S. Karabulut. "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes". *Construction and Building Materials* 23, no. 3, pp: 1223-1231. 2009.
54. H. Yazici, H. Yigiter, A. S. Karabulut and B. Baradan. "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete". *Fuel* 8, no. 12, pp: 2401-2407. 2008.
55. UNE-EN 197-1. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cemento comunes". 2000.
56. C. Wang, C. H. Yang, F. Liu, C. J. Wan and X. C. Pu. "Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials". *Cement & Concrete Composites* 34, no. 4, pp: 538-544. 2012.
57. "[Http://www.Ricehuskash.com/](http://www.Ricehuskash.com/)". 2018.
58. D. Y. Yoo and N. Banthia. "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review". *Cement & Concrete Composites* 73, pp:267-280. 2016.



59. V. T. A. Van, C. Rossler, D. D. Bui and H. M. Ludwig. "Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete". *Cement & Concrete Composites* 53, pp: 270-278. 2014.
60. H. H. Huang, X. J. Gao, H. Wang and H. Ye. "Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete". *Construction and Building Materials* 149, pp: 621-628. 2017.
61. V. T. Nguyen, G. A. Ye, K. van Breugel, A. L. A. Fraaij and D. D. Bui. "The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete". *Construction and Building Materials* 25, no. 4, pp:2030-2035. 2011.
62. H. Le, K. Siewert and H.-M. Ludwig. "Synergistic effect of rice husk ash and fly ash on properties of self-compacting high performance concrete". *Proceedings of hipermat 2012 3rd international symposium on uhpc and nanotechnology for high performance construction materials*, E. F. M. Schmidt, C. Glotzbach, S. Fröhlich, S. Piotrowski (Editor), Kassel, Germany, pp. 187-195. 2012.
63. N. Van Tuan and K. Van Breugel. "Ultra high performance concrete made with rice husk ash for reduced autogenous shrinkage". *Proceedings of the 4th International FIB Congress*, Universities Press, Mumbai, India, 2014.
64. B. S. Thomas, S. Kumar and H. S. Arel. "Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material - A review". *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 80, pp: 550-561. 2017.
65. M. A. A. Aldandooh, N. M. Bunnori and M. A. M. Johari. "Development of green ultra-high performance fiber reinforced concrete containing ultrafine palm oil fuel ash". *Construction and Building Materials* 48, pp: 379-389. 2013.
66. M. A. A. Aldahdooh, N. M. Bunnori and M. A. M. Johari. "Influence of palm oil fuel ash on ultimate flexural and uniaxial tensile strength of green ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites". *Materials & Design* 54 , pp: 694-701. 2014.
67. W. Huang, H. Kazemi-Kamyab, W. Sun and K. Scrivener. "Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC)". *Cement & Concrete Composites* 77, pp: 86-101. 2017.



68. R. Yu, P. Spiesz and H. J. H. Brouwers. "Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)". *Cement and Concrete Research* 56, pp: 29-39. 2014.
69. N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou. "Development of ultra-high-performance concrete using glass powder - Towards ecofriendly concrete". *Construction and Building Materials* 125, pp: 600-612. 2016.
70. V. Vaitkevicius, E. Serelis and H. Hilbig. "The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete". *Construction and Building Materials* 68, pp: 102-109. 2014.
71. S. H. Liu, G. S. Xie, L. H. Li, Y. Liu and M. J. Rao. "Effect of glass powder on strength and microstructure of ultra high performance cement-based materials". *Advanced Building Materials and Sustainable Architecture*, 174-177 (2012), pp: 1281-1284. 2012.
72. N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou. "Partial substitution of silica fume with fine glass powder in uhpc: Filling the micro gap". *Construction and Building Materials* 139, pp: 374-383. 2017.
73. C. D. Johnston. "Waste glass as coarse aggregate for concrete". *Journal of Testing and Evaluation* 2, no. 5, pp: 344-350. 1974.
74. B. Taha and G. Nounu. "Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement". *Construction and Building Materials* 22, no. 5, pp: 713-720. 2008.
75. A. Shayan and A. M. Xu. "Value-added utilisation of waste glass in concrete". *Cement and Concrete Research* 34, no. 1, pp: 81-89. 2004.
76. N. Sebaibi, M. Benzerzour, N. E. Abriak and C. Binetruy. "Mechanical properties of concrete-reinforced fibres and powders with crushed thermoset composites: The influence of fibre/matrix interaction". *Construction and Building Materials* 29, pp: 332-338. 2012.
77. M. Gesoglu, E. Guneyisi, A. H. Nahhab and H. Yazici. "Properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites made with gypsum-contaminated aggregates and cured at normal and elevated temperatures". *Construction and Building Materials* 9, pp: 427-438. 2015.



78. M. Gesoglu, E. Guneyisi, A. H. Nahhab and H. Yazici. "The effect of aggregates with high gypsum content on the performance of ultra-high strength concretes and Portland cement mortars". *Construction and Building Materials* 110, pp: 346-354. 2016.
79. M. Orgass and Y. Klug. "Fibre reinforced ultra-high strength concretes". *Proceedings of the international symposium on ultra high performance concrete*, M. Schmidt, Fehling, E., and Geisenhanslüke, C (Editor), Kassel University Press, Kassel, Germany, pp. 637-647. 2004.
80. S. Abbas, A. M. Soliman and M. L. Nehdi. "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages". *Construction and Building Materials* 75, pp: 429-441. 2015.
81. P. Maca, R. Sovjak and T. Vavrinik. "Experimental investigation of mechanical properties of UHPFRC". *Concrete and Concrete Structures 2013, 6th International Conference*, Slovakia 65, pp: 14-19. 2013.
82. Z. M. Wu, C. J. Shi, W. He and L. M. Wu. "Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete". *Construction and Building Materials* 103, pp: 8-14. 2016.
83. K. Yuliarti, F. Ekkehard and I. Mohammed. "UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube?". *Procedia Engineering* 125, pp: 1076-1080. 2015.
84. A. S. El-Dieb. "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers". *Materials & Design* 30, no. 10, pp: 4286-4292. 2009.
85. A. M. T. Hassan, S. W. Jones and G. H. Mahmud. "Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)". *Construction and Building Materials* 37, pp: 874-882. 2012.
86. A. A. E. Aliabdo, A. E. M. Abd_Elmoaty and M. Hamdy. "Effect of internal short fibers, steel reinforcement, and surface layer on impact and penetration resistance of concrete". *Alexandria Engineering Journal* 52, no. 3, pp: 407-417. 2013.



87. D. Y. Yoo, S. T. Kang and Y. S. Yoon. "Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC". *Construction and Building Materials* 72, pp: 458-458. 2014.
88. S. Ryosuke, S. Hideki, P. Withit and Y. Sato. "Tensile behaviors and fiber orientation of UHPC". *Proceedings of the second international symposium on ultra high performance concrete*, E. Fehling, Schmidt, M., and Stürwald (Editor), Kassel University Press, Kassel, Germany, pp: 161-168. 2008.
89. B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk and S. Amziane. "Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material". *Construction and Building Materials* 24, no. 9, pp: 1664-1671. 2010.
90. S. T. K. Sung Wook Kim, Jung Jun Park, Gum Sung and Ryu. "Effect of filling method on fibre orientation & dispersion and mechanical properties of uhpc". *Proceedings of the second international symposium on ultra high performance concrete*, E. Fehling, Schmidt, M., and Stürwald. S. (Editor), Kassel University Press, Kassel, Germany, pp: 185-192. 2008.
91. S. J. Barnett, J. F. Lataste, T. Parry, S. G. Millard and M. N. Soutsos. "Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength". *Materials and Structures* 43, no. 7, pp: 1009-1023. 2010.
92. S. T. Kang and J. K. Kim. "The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC)". *Cement and Concrete Research* 41, no. 10, pp: 1001-1014. 2011.
93. MÁS QUE INGENIERÍA. "Hormigones especiales (II): Hormigón reforzado con fibras". 2018. <https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-reforzado-con-fibras/>.
94. C. J. Mendoza, C. Aire and P. Dávila. "Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido". *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo* 2, no. 2, pp: 35-47. 2011.
95. T. Chen, X. Gao and M. Ren. "Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete". *Construction and Building Materials* 158, Supplement C, pp: 864-872. 2018.



96. J. Golaszewski and J. Szwabowski. "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars". *Cement and Concrete Research* 34, no. 2, pp: 235-248. 2004.
97. O. Mazanec, D. Lowke and P. Schiessl. "Mixing of high performance concrete: Effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time". *Materials and Structures* 43, no. 3, pp: 357-365. 2010.
98. T. Hirschi and F. Wombacher. "Influence of different superplasticizers on UHPC". *Proceedings of the 2nd International symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany*, pp: 77-84. 2008.
99. N. Viet Tue, M. Orgass and J. Ma. "Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh uhpc". *Proceedings of the 2nd International symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany*, pp: 93-100. 2008.
100. C. Schrofl, M. Gruber and J. Plank. "Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC)". *Cement and Concrete Research* 42, no. 11, pp: 1401-1408. 2012.
101. P. Richard and M. Cheyrezy. "Composition of reactive powder concretes". *Cement and Concrete Research* 25, no. 7, pp: 1501-1511. 1995.
102. P. Mounanga, K. Cherkaoui, A. Khelidj, M. Courtial, M. N. de Noirfontaine and F. Dunstetter. "Extrudable reactive powder concretes: Hydration, shrinkage and transfer properties". *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16, pp: S99-S114. 2012.
103. P. K. Chang and Y. N. Peng. "Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete". *Cement and Concrete Research* 31, no. 1, pp: 87-95. 2001.
104. O. M. Abdulkareem, A. Ben Fraj, M. Bouasker and A. Khelidj. "Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC". *Construction and Building Materials* 163, no. Supplement C, pp: 235-246. 2018
105. A. Simon. "New AFGC recommendations on UHPFRC: Chapter 1. Mechanical characteristics and behavior of uhpfrc". *Designing and building with UHPFRC - State of the art and development*, Resplendino (Editor), London, 2011.



106. UNE-EN 12390-2. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia".
107. Z. D. Rong, W. Sun and Y. S. Zhang. "Dynamic compression behavior of ultra-high performance cement based composites". *International Journal of Impact Engineering* 37, no. 5, pp: 515-520. 2010.
108. H. Yazici. "The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures." *Building and Environment* 42, no. 5, pp: 2083-2089. 2007.
109. A. L. Hoang and E. Fehling. "Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete." *Construction and Building Materials* 153, pp: 790-806. 2017.
110. R. S. Edwin, M. De Schepper, E. Gruyaert and N. De Belie. "Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar". *Construction and Building Materials* 119, pp: 31-44. 2016.
111. Resplendino, Jacques. "Ultra High Performance Concrete: New AFGC Recommendations". SETRA-AFGC. June 2013.
112. M. H. Ali, Y. Z. Dinkha and J. H. Haido. "Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders". *Engineering Science and Technology-an International Journal-Jestech* 20, no. 2, pp: 536-541. 2017.
113. H. H. Nassif, H. Najm and N. Suksawang. "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC". *Cement & Concrete Composites* 27, no. 6, pp: 661-670. 2005.
114. M. Ibrahim, M. Farhat, M. Issa and J. Hasse. "Effect of material constituents on mechanical and fracture mechanics properties of ultra-high-performance concrete". *Aci Materials Journal* 114, pp: 453-465. 2017.
115. G. Ye. "Mitigation of autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete by rice husk ash". *Journal of the Chinese Ceramic Society* 40(2). 2012.



116. BS 8500-2. "Concrete, complementary British Standard to BS EN 206-1, specification for constituent materials and concrete, british standards institution." 2006.
117. D. H. Wang, C. J. Shi, Z. M. Wu, J. F. Xiao, Z. Y. Huang and Z. Fang,. "A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties". *Construction and Building Materials* 96, pp:368-377. 2015.
118. ASTM C1202. "Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration". 2012.
119. P. Smarzewski and D. Barnat-Hunek. "Mechanical and durability related properties of high performance concrete made with coal cinder and waste foundry sand". *Construction and Building Materials* 121, pp: 9-17. 2016.
120. C.-T. Liu and J.-S. Huang. "Fire performance of highly flowable reactive powder concrete". *Construction and Building Materials* 23, no. 5, pp: 2072-2079. 2009.
121. J. Resplendino. "State of art of design and construction of UHPFRC structures in France". *Proceedings of hipermat 2012. 3rd International Symposium on UHPC and nanotechnology for High Performance Construction Materials*, E. F. M. Schmidt, C. Glotzbach, S. Fröhlich, S. Piotrowski. (Editor), Kassel, Germany, pp. 27-41. 2012.
122. Ductal®. "Innovative UHPC solution". Ductal®. 2018. <https://www.ductal.com/en>.
123. The Italian Lab arredo urbano. Street furniture. Home principale. 2018. <http://www.theitalianlab.it/>.
124. U. Goldbach and S. Stehling. "Precasting of uhpc elements". *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, pp: 589-595. 2008
125. Wildbrücke - Kommunalgesellschaft - Gemeindeeinrichtungen & Rat und Hilfe im Trauerfall-Gemeinde Völkermarkt. 2018. <https://www.voelkermarkt.gv.at/gemeindeeinrichtungen-undbestattung/kommunalgesellschaft/wildbruecke.html>.
126. Ductal®. Hydraulic Structures. 2018. <https://www.ductal.com/en/engineering/hydraulic-structures>.



127. E. Brühwiler and E. Denarié. "Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete." Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, E. Fehling, Schmidt, M., and Stürwald. S., (Editor), Kassel University Press, Kassel, Germany, pp: 895-902. 2008
128. P. Serna, J. Á. López, H. Coll, E. Camacho, J. Navarro-Gregori and F. Galán. "Pasarela de hormigón de muy alto rendimiento sobre el barranco de las Ovejas (Alicante)". Hormigón y Acero 66, no. 275, pp: 23-42. 2015
129. Ductal®. " Shepherds Creek Bridge, Sydney, Australia - Joint Fill." Ductal®. 2018. <https://www.ductal.com/en/engineering/shepherds-creek-bridge-sydney-australia-joint-fill-solution>.
130. "Tokyo International Airport (Haneda Airport)". 2019. <https://www.toa-const.co.jp/eng/works/list104/>.
131. NF P18-470. "Concrete - Ultra-high performance fibre-reinforced concrete - Specifications, performance, production and conformity." AFNOR, France, 2016.
132. NF P18-710. "National addition to Eurocode 2 - Design of concrete structures : Specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)." France, 2016.
133. NF P18-451. "Execution of concrete structures — Specific rules for UHPC."
134. ASTM C1856/C1856m-17. "Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance concrete." ASTM, 2017.
135. GB/T 31387-2015. "Reactive powder concrete". Administration of Quality Supervision and S. A. o. China. , China, 2015.
136. CSA. A23.1-14/A23.2-14. "Concrete materials and methods of concrete construction / test methods and standard practices for concrete". Standards Council of Canada, 2014.
137. N. Gowripalan and R. Gilbert. "Design guidelines for RPC prestressed concrete beams". 2000.
138. Japan society of civil engineers (JSCE). "Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (DRAFT)". JSCE guidelines for concrete no. 9. 2006.



139. Sia 2052, SNR 592052:2016. "Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) - Materials, design and execution". Swiss Society of Engineers and Architects, Zürich, 2016.
140. J. Walraven. "On the way to International design recommendations for ultra high performance fibre reinforced concrete." Proceedings of hipermat 2012 3rd international symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials, M. Schmidt, Fehling, E., Glotzbach, C., Fröhlich, S., and Piotrowski (Editor), Kassel University Press, Kassel, Germany, pp: 51-58. 2012.
141. AS3600-94. Second edition, Standards association of Australia. Australian standard: Concrete structures. Homebush, NSW, 1996
142. Japan Society of Civil Engineers. "Standard specifications for concrete structures". Tokyo. 2002.
143. R. T. 162-TDF. "Final recommendation of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete sigma-epsilon-design method." Materials and Structures 36, no. 262, pp: 560-567. 2003.
144. UNE-EN 14889-1. "Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad". Enero 2008.
145. UNE-EN 933-1. "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas".
146. UNE-EN 933-2. "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas".
147. UNE-EN 1097-6. "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua".
148. UNE-EN 1097-7. "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 7: Determinación de la densidad real del filler".
149. UNE-EN 933-8. "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena".
150. UNE-EN 12390-1. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes". 2013.



151. UNE-EN 196-1. "Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencia mecánicas".
152. UNE 80113. "Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la expansión en autoclave".
153. UNE-EN 12390-3. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas". 2003.
154. NF P 18-470. "Bétons — Bétons fibrés à ultra hautes performances — Spécification, performance, production et conformité". France, 2016.
155. ASTM C230 / C230M-14. "Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement". West Conshohocken, 2014.
156. UNE-EN 12390-7. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido".
157. UNE-EN 12390-13. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión". 2014.
158. J. A. L. Martínez. "Characterisation of the tensile behaviour of UHPFRC by means of four-point bending tests". Polytechnic University of Valencia. 2017.
159. UNE 80-112-89. "Métodos de ensayo de cementos: Ensayos físicos: Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua".
160. UNE-EN 1936. "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total". 2007.
161. A. Nazari, S. Riahi, S. Riahi, S. Fatemeh Shamekhi and A. Khademno. "Benefits of Fe₂O₃ nanoparticles in concrete mixing matrix". Journal of American Science 6 (4). January 2010
162. J. J. Park, S.-T. Kang, K. T. Koh and S.-W. Kim. "Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion". 2008.



ANEJO 1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

INTRODUCCIÓN.

En este anejo se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los áridos utilizados y de los ensayos de las 28 amasadas de HMARF realizadas. También se muestran los resultados de aquellas amasadas que han sido repetidas. Los ensayos se han realizado siguiendo las especificaciones que se muestran en el programa experimental.

Los resultados se presentan en forma de tablas y gráficos y se muestran los resultados de los ensayos para las seis sustituciones realizadas y para los cuatro niveles de remplazo. En la **tabla 27** se resumen las sustituciones realizadas y los niveles de sustitución llevados a cabo.

Material a sustituir	Sustituto	Siglas	Porcentajes de sustitución			
Arena Silícea 0/0,5 mm	Arena residual de mina	AM	35,00%	50,00%	70,00%	100,00%
Arena Silícea 0,5/1,6 mm	Grueso de granito	GG	35,00%	50,00%	70,00%	100,00%
Harina sílice 0/40 μ m	Finos de mina	FM	35,00%	50,00%	70,00%	100,00%
	Finos del lavadero de mina	LM	35,00%	50,00%	70,00%	100,00%
	Finos de granito	FG	35,00%	50,00%	70,00%	100,00%
	Finos de granito con granalla	FGG	35,00%	50,00%	70,00%	100,00%

Tabla 27. Resumen del programa de ensayos.



RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

Distribución granulométrica.

En las tablas que se muestran a continuación se recogen los datos para determinar la distribución granulométrica de los diferentes áridos y residuos empleados en este estudio.

Arena silícea 0/0,5 mm				
TAMIZ UNE (mm)	RETENIDO parcial (kg)	RETENIDO acumulado (kg)	% acumulado	
			RETENIDO	PASA
31,5	0	0	0	100
16	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1	0	0	0	100
0,5	0,131	0,131	43,2	56,8
0,25	0,133	0,264	87,1	12,9
0,125	0,037	0,301	99,3	0,7
0,063	0,002	0,303	100	0
Módulo granulométrico (M.G.)				3,3
Material acumulado en el fondo (kg):				0

Tabla 28. Granulometría de la arena silícea 0/0,5 mm.



Arena silícea 0,5/1,6 mm				
TAMIZ UNE (mm)	RETENIDO parcial (kg)	RETENIDO acumulado (kg)	% acumulado	
			RETENIDO	PASA
31,5	0	0	0	100
16	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1	0,037	0,037	12,5	87,5
0,5	0,127	0,164	55,2	44,8
0,25	0,110	0,274	92,3	7,7
0,125	0,023	0,297	100	0
0,063	0	0,297	100	0
Módulo granulométrico (M.G.)				3,6
Material acumulado en el fondo (kg):				0

Tabla 29. Granulometría de la arena silícea 0,5/1,6 mm.

Gresos de granito				
TAMIZ UNE (mm)	RETENIDO parcial (kg)	RETENIDO acumulado (kg)	% acumulado	
			RETENIDO	PASA
31,5	0	0	0	100
16	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	0,011	0,011	3,4	96,6
2	0,021	0,032	9,8	90,2
1	0,029	0,061	18,7	81,3
0,5	0,044	0,105	32,1	67,9
0,25	0,066	0,171	52,3	47,7
0,125	0,073	0,244	74,6	25,4
0,063	0,060	0,304	93	7
Módulo granulométrico (M.G.)				2,84
Material acumulado en el fondo (kg):				0,023

Tabla 30. Granulometría de los gresos de granito.



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Finos de Mina			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
0,4	0,06	2,97	0,06
0,5	0,24	3,58	0,30
0,6	0,11	3,77	0,41
0,7	0,27	3,81	0,68
0,8	0,15	3,67	0,83
0,9	0,15	3,44	0,98
1,0	0,15	3,15	1,13
1,1	0,15	2,84	1,28
1,2	0,15	2,52	1,43
1,3	0,14	2,20	1,57
1,4	0,13	1,90	1,70
1,5	0,12	1,62	1,82
1,7	0,12	1,39	1,94
1,8	0,11	1,19	2,05
2,0	0,10	1,04	2,15
2,2	0,10	0,91	2,25
2,4	0,10	0,82	2,35
2,7	0,10	0,77	2,45
2,9	0,11	0,74	2,56
3,2	0,12	0,73	2,67
3,5	0,13	0,74	2,80
3,9	0,15	0,76	2,95
4,2	0,17	0,78	3,12
4,7	0,19	0,81	3,31
5,1	0,22	0,85	3,53
5,6	0,25	0,88	3,78
6,2	0,28	0,91	4,06
6,8	0,32	0,93	4,38
7,4	0,36	0,96	4,74
8,2	0,40	0,98	5,14
8,9	0,45	1,00	5,59
9,8	0,50	1,02	6,09
10,8	0,56	1,04	6,65

Arena Residual de Mina			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
0,4	0,04	2,76	0,04
0,5	0,15	3,38	0,19
0,6	0,08	3,60	0,27
0,7	0,19	3,75	0,46
0,8	0,10	3,68	0,56
0,9	0,11	3,53	0,67
1,0	0,11	3,32	0,78
1,1	0,11	3,10	0,89
1,2	0,12	2,85	1,01
1,3	0,12	2,60	1,13
1,4	0,12	2,35	1,25
1,5	0,11	2,12	1,36
1,7	0,11	1,92	1,47
1,8	0,11	1,74	1,58
2,0	0,11	1,58	1,69
2,2	0,11	1,44	1,80
2,4	0,11	1,33	1,91
2,7	0,12	1,23	2,03
2,9	0,12	1,16	2,15
3,2	0,12	1,10	2,27
3,5	0,13	1,05	2,40
3,9	0,14	1,01	2,54
4,2	0,15	0,97	2,69
4,7	0,16	0,94	2,85
5,1	0,17	0,91	3,02
5,6	0,18	0,88	3,20
6,2	0,19	0,85	3,39
6,8	0,20	0,83	3,59
7,4	0,21	0,80	3,80
8,2	0,22	0,77	4,02
8,9	0,24	0,74	4,26
9,8	0,25	0,71	4,51
10,8	0,26	0,69	4,77



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Finos de Mina				Arena Residual de Mina			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.	Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
11,8	0,63	1,07	7,28	11,8	0,28	0,67	5,05
13,0	0,72	1,10	8,00	13,0	0,30	0,65	5,35
14,3	0,81	1,13	8,81	14,3	0,32	0,63	5,67
15,7	0,93	1,18	9,74	15,7	0,34	0,61	6,01
17,2	1,06	1,23	10,80	17,2	0,37	0,60	6,38
18,9	1,22	1,29	12,02	18,9	0,40	0,60	6,78
20,7	1,41	1,35	13,43	20,7	0,44	0,60	7,22
22,7	1,61	1,41	15,04	22,7	0,48	0,60	7,70
25,0	1,83	1,46	16,87	25,0	0,53	0,60	8,23
27,4	2,07	1,50	18,94	27,4	0,59	0,61	8,82
30,1	2,32	1,53	21,26	30,1	0,67	0,62	9,49
33,0	2,58	1,55	23,84	33,0	0,75	0,64	10,23
36,2	2,85	1,56	26,69	36,2	0,87	0,67	11,10
39,8	3,12	1,56	29,81	39,8	1,01	0,71	12,11
43,7	3,40	1,55	33,21	43,7	1,19	0,77	13,30
47,9	3,68	1,53	36,89	47,9	1,43	0,84	14,73
52,6	3,96	1,49	40,85	52,6	1,74	0,93	16,47
57,8	4,23	1,45	45,08	57,8	2,13	1,04	18,60
63,4	4,48	1,41	49,56	63,4	2,64	1,17	21,24
69,6	4,72	1,35	54,28	69,6	3,26	1,32	24,50
76,4	4,92	1,28	59,20	76,4	3,98	1,47	28,48
83,9	5,04	1,19	64,24	83,9	4,75	1,59	33,23
92,1	5,06	1,09	69,30	92,1	5,50	1,68	38,73
101,0	4,94	0,97	74,24	101,0	6,16	1,72	44,89
111,0	4,68	0,84	78,92	111,0	6,64	1,69	51,53
121,8	4,29	0,70	83,21	121,8	6,88	1,59	58,41
133,8	3,82	0,57	87,03	133,8	6,87	1,45	65,28
146,8	3,31	0,45	90,34	146,8	6,59	1,26	71,87
161,2	2,81	0,35	93,15	161,2	6,10	1,07	77,97
176,9	2,31	0,26	95,46	176,9	5,45	0,87	83,42
194,2	1,82	0,19	97,28	194,2	4,69	0,68	88,11
213,2	1,32	0,12	98,60	213,2	3,88	0,51	91,99
234,1	0,84	0,07	99,44	234,1	3,04	0,37	95,03



Finos de Mina				Arena Residual de Mina			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.	Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
257,0	0,42	0,03	99,86	257,0	2,22	0,24	97,25
282,1	0,14	0,01	100,00	282,1	1,46	0,15	98,71
309,6	0,00	0,00	100,00	309,6	0,82	0,07	99,53
339,9	0,00	0,00	100,00	339,9	0,35	0,03	99,88
373,2	0,00	0,00	100,00	373,2	0,10	0,01	99,98
409,6	0,00	0,00	100,00	409,6	0,02	0,00	100,00
449,7	0,00	0,00	100,00	449,7	0,00	0,00	100,00
500,0	0,00	0,00	100,00	500,0	0,00	0,00	100,00

Tabla 31. Granulometría de los finos de mina y la arena residual de mina.

Humo de Sílice				Harina de Sílice G40			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superficial (%)	% Retenido acum.	Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superficial (%)	% Retenido acum.
0,4	0,05	1,47	0,05	0,4	0,43	3,07	0,43
0,5	0,17	2,90	0,22	0,5	2,82	5,91	3,25
0,6	0,09	3,08	0,31	0,6	1,25	6,20	4,50
0,7	0,10	3,16	0,41	0,7	1,38	6,26	5,88
0,8	0,11	3,18	0,52	0,8	1,50	6,18	7,38
0,9	0,12	3,11	0,64	0,9	1,58	5,93	8,96
1,0	0,12	2,97	0,76	1,0	1,61	5,52	10,57
1,1	0,13	2,78	0,89	1,1	1,61	5,01	12,18
1,2	0,13	2,56	1,02	1,2	1,57	4,46	13,75
1,3	0,13	2,34	1,15	1,3	1,52	3,92	15,27
1,4	0,13	2,11	1,28	1,4	1,44	3,39	16,71
1,5	0,12	1,90	1,40	1,5	1,35	2,89	18,06
1,7	0,12	1,70	1,52	1,7	1,25	2,44	19,31
1,8	0,12	1,53	1,64	1,8	1,15	2,06	20,46
2,0	0,12	1,39	1,76	2,0	1,07	1,74	21,53
2,2	0,12	1,28	1,88	2,2	1,01	1,49	22,54
2,4	0,13	1,20	2,01	2,4	0,96	1,30	23,50
2,7	0,13	1,14	2,14	2,7	0,94	1,16	24,44
2,9	0,14	1,12	2,28	2,9	0,95	1,06	25,39



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Humo de Sílice			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superficial (%)	% Retenido acum.
3,2	0,15	1,12	2,43
3,5	0,17	1,13	2,60
3,9	0,19	1,17	2,79
4,4	0,22	1,21	3,01
4,7	0,25	1,25	3,26
5,1	0,29	1,30	3,55
5,6	0,33	1,35	3,88
6,2	0,37	1,39	4,25
6,8	0,41	1,42	4,66
7,4	0,46	1,44	5,12
8,2	0,51	1,46	5,63
8,9	0,57	1,47	6,20
9,8	0,62	1,47	6,82
10,8	0,68	1,46	7,50
11,8	0,74	1,44	8,24
13,0	0,80	1,42	9,04
14,3	0,86	1,40	9,90
15,7	0,93	1,37	10,83
17,2	1,00	1,34	11,83
18,9	1,07	1,31	12,90
20,7	1,15	1,29	14,05
22,7	1,24	1,26	15,29
25,0	1,33	1,24	16,62
27,4	1,43	1,21	18,05
30,1	1,53	1,18	19,58
33,0	1,63	1,15	21,21
36,2	1,74	1,12	22,95
39,8	1,87	1,09	24,82
43,7	2,01	1,06	26,83
47,9	2,17	1,05	29,00
52,6	2,36	1,04	31,36
57,8	2,58	1,03	33,94

Harina de Sílice G40			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superficial (%)	% Retenido acum.
3,2	0,98	1,00	26,37
3,5	1,05	0,97	27,42
3,9	1,13	0,96	28,55
4,4	1,24	0,95	29,79
4,7	1,35	0,95	31,14
5,1	1,48	0,94	32,62
5,6	1,60	0,93	34,22
6,2	1,71	0,91	35,93
6,8	1,81	0,87	37,74
7,4	1,90	0,83	39,64
8,2	1,97	0,79	41,61
8,9	2,03	0,74	43,64
9,8	2,08	0,69	45,72
10,8	2,12	0,64	47,84
11,8	2,16	0,60	50,00
13,0	2,19	0,55	52,19
14,3	2,25	0,51	54,44
15,7	2,34	0,49	56,78
17,2	2,48	0,47	59,26
18,9	2,66	0,46	61,92
20,7	2,83	0,45	64,75
22,7	2,95	0,42	67,70
25,0	2,98	0,39	70,68
27,4	2,94	0,35	73,62
30,1	2,85	0,31	76,47
33,0	2,75	0,27	79,22
36,2	2,68	0,24	81,90
39,8	2,62	0,21	84,52
43,7	2,53	0,19	87,05
47,9	2,37	0,16	89,42
52,6	2,12	0,13	91,54
57,8	1,78	0,10	93,32



Humo de Sílice				Harina de Sílice G40			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superficial (%)	% Retenido acum.	Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superficial (%)	% Retenido acum.
63,4	2,85	1,04	36,79	63,4	1,41	0,07	94,73
69,6	3,17	1,06	39,96	69,6	1,06	0,05	95,79
76,4	3,55	1,08	43,51	76,4	0,80	0,03	96,59
83,9	3,97	1,10	47,48	83,9	0,64	0,03	97,23
92,1	4,41	1,11	51,89	92,1	0,58	0,02	97,81
101,1	4,82	1,10	56,71	101,1	0,56	0,02	98,37
111,0	5,15	1,08	61,86	111,0	0,54	0,02	98,91
121,8	5,36	1,02	67,22	121,8	0,48	0,01	99,39
133,8	5,42	0,94	72,64	133,8	0,36	0,01	99,75
146,8	5,32	0,84	77,96	146,8	0,21	0,00	99,96
161,8	5,07	0,73	83,03	161,8	0,02	0,00	99,98
176,9	4,66	0,61	87,69	176,9	0,02	0,00	100,00
194,2	4,07	0,49	91,76	194,2	0,00	0,00	100,00
213,2	3,30	0,36	95,06	213,2	0,00	0,00	100,00
234,1	2,41	0,24	97,47	234,1	0,00	0,00	100,00
257,0	1,51	0,14	98,98	257,0	0,00	0,00	100,00
282,1	0,73	0,06	99,71	282,1	0,00	0,00	100,00
309,6	0,24	0,02	99,95	309,6	0,00	0,00	100,00
339,9	0,04	0,00	99,99	339,9	0,00	0,00	100,00
373,2	0,01	0,00	100,00	373,2	0,00	0,00	100,00
409,6	0,00	0,00	100,00	409,6	0,00	0,00	100,00
450,00	0,00	0,00	100,00	450,00	0,00	0,00	100,00

Tabla 32. Granulometría del humo de sílice y la harina de sílice.

Finos del Lavadero de la Mina				CEM I 42,5 R/SR			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf (%)	% Retenido acum.	Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
0,4	0,11	2,10	0,11	0,4	0,49	2,75	0,49
0,5	0,45	4,06	0,56	0,5	1,88	5,29	2,37
0,6	0,22	4,26	0,78	0,6	0,91	5,56	3,28
0,7	0,24	4,31	1,02	0,7	1,01	5,61	4,29
0,7	0,26	4,27	1,28	0,7	1,09	5,55	5,38



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Finos del Lavadero de la Mina			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf (%)	% Retenido acum.
0,8	0,28	4,11	1,56
0,9	0,28	3,83	1,84
1,0	0,28	3,50	2,12
1,1	0,28	3,14	2,40
1,2	0,27	2,79	2,67
1,3	0,26	2,44	2,93
1,4	0,25	2,12	3,18
1,5	0,24	1,83	3,42
1,7	0,23	1,60	3,65
1,8	0,22	1,42	3,87
2,0	0,22	1,28	4,09
2,2	0,22	1,18	4,31
2,4	0,23	1,11	4,54
2,7	0,25	1,09	4,79
2,9	0,27	1,09	5,06
3,2	0,30	1,10	5,36
3,5	0,34	1,13	5,70
3,9	0,38	1,17	6,08
4,2	0,44	1,21	6,52
4,7	0,49	1,24	7,01
5,1	0,55	1,27	7,56
5,6	0,62	1,29	8,18
6,2	0,68	1,30	8,86
6,8	0,75	1,30	9,61
7,4	0,82	1,30	10,43
8,2	0,89	1,28	11,32
8,9	0,95	1,25	12,27
9,8	1,02	1,22	13,29
10,8	1,09	1,19	14,38
11,8	1,17	1,16	15,55
13,0	1,25	1,13	16,80
14,3	1,34	1,10	18,14
15,7	1,45	1,09	19,59

CEM I 42,5 R/SR			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
0,8	1,15	5,33	6,53
0,9	1,18	4,98	7,71
1,0	1,19	4,54	8,90
1,1	1,17	4,07	10,07
1,2	1,14	3,62	11,21
1,3	1,09	3,17	12,30
1,4	1,04	2,75	13,34
1,5	0,99	2,38	14,33
1,7	0,95	2,08	15,28
1,8	0,92	1,83	16,20
2,0	0,90	1,63	17,10
2,2	0,90	1,48	18,00
2,4	0,91	1,38	18,91
2,7	0,95	1,31	19,86
2,9	1,02	1,27	20,88
3,2	1,10	1,25	21,98
3,5	1,20	1,24	23,18
3,9	1,31	1,24	24,49
4,2	1,44	1,24	25,93
4,7	1,56	1,23	27,49
5,1	1,69	1,21	29,18
5,6	1,81	1,18	30,99
6,2	1,91	1,13	32,90
6,8	2,01	1,08	34,91
7,4	2,08	1,03	36,99
8,2	2,15	0,96	39,14
8,9	2,20	0,90	41,34
9,8	2,24	0,84	43,58
10,8	2,28	0,77	45,86
11,8	2,31	0,71	48,17
13,0	2,35	0,66	50,52
14,3	2,44	0,62	52,96
15,7	2,57	0,60	55,53



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Finos del Lavadero de la Mina			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf (%)	% Retenido acum.
17,2	1,58	1,08	21,17
18,9	1,74	1,08	22,91
20,7	1,91	1,09	24,82
22,7	2,09	1,08	26,91
25,0	2,28	1,07	29,19
27,4	2,47	1,06	31,66
30,1	2,67	1,04	34,33
33,0	2,87	1,02	37,20
36,2	3,09	1,00	40,29
39,8	3,31	0,98	43,60
43,7	3,51	0,94	47,11
47,9	3,67	0,90	50,78
52,6	3,78	0,84	54,56
57,8	3,86	0,78	58,42
63,4	3,91	0,72	62,33
69,6	3,95	0,67	66,28
76,4	3,98	0,61	70,26
83,9	3,98	0,56	74,24
92,1	3,94	0,50	78,18
101,1	3,81	0,44	81,99
111,0	3,57	0,38	85,56
121,8	3,25	0,31	88,81
133,8	2,87	0,25	91,68
146,8	2,46	0,20	94,14
161,2	2,03	0,15	96,17
176,9	1,58	0,10	97,75
194,2	1,12	0,07	98,87
213,2	0,70	0,04	99,57
234,1	0,33	0,02	99,90
257,0	0,08	0,01	99,98
282,1	0,02	0,00	100,00
309,6	0,00	0,00	100,00
339,9	0,00	0,00	100,00

CEM I 42,5 R/SR			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
17,2	2,75	0,59	58,28
18,9	2,95	0,57	61,23
20,7	3,14	0,55	64,37
22,7	3,29	0,53	67,66
25,0	3,39	0,50	71,05
27,4	3,46	0,46	74,51
30,1	3,49	0,42	78,00
33,0	3,48	0,39	81,48
36,2	3,39	0,34	84,87
39,8	3,18	0,29	88,05
43,7	2,81	0,23	90,86
47,9	2,31	0,18	93,17
52,6	1,74	0,12	94,91
57,8	1,22	0,08	96,13
63,4	0,83	0,05	96,96
69,6	0,61	0,03	97,57
76,4	0,51	0,02	98,08
83,9	0,50	0,02	98,58
92,1	0,49	0,02	99,07
101,1	0,43	0,02	99,50
111,0	0,29	0,01	99,79
121,8	0,14	0,00	99,93
133,8	0,04	0,00	99,97
146,8	0,03	0,00	100,00
161,2	0,00	0,00	100,00
176,9	0,00	0,00	100,00
194,2	0,00	0,00	100,00
213,2	0,00	0,00	100,00
234,1	0,00	0,00	100,00
257,0	0,00	0,00	100,00
282,1	0,00	0,00	100,00
309,6	0,00	0,00	100,00
339,9	0,00	0,00	100,00



Finos del Lavadero de la Mina			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
373,2	0,00	0,00	100,00
409,6	0,00	0,00	100,00
450,0	0,00	0,00	100,00

CEM I 42,5 R/SR			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
373,2	0,00	0,00	100,00
409,6	0,00	0,00	10,000
450,0	0,00	0,00	100,00

Tabla 33. Granulometría de los finos del lavadero de la mina y el cemento.

Finos de Granito			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
0,4	0,59	2,73	0,59
0,5	2,31	5,29	2,90
0,6	1,12	5,58	4,02
0,7	1,25	5,67	5,27
0,7	1,37	5,64	6,64
0,8	1,45	5,47	8,09
0,9	1,50	5,15	9,59
1,0	1,52	4,75	11,11
1,1	1,52	4,31	12,63
1,2	1,49	3,87	14,12
1,3	1,45	3,43	15,57
1,4	1,40	3,01	16,97
1,5	1,34	2,63	18,31
1,7	1,29	2,31	19,60
1,8	1,25	2,04	20,85
2,0	1,23	1,81	22,13
2,2	1,22	1,64	23,35
2,4	1,23	1,51	24,58
2,7	1,27	1,42	25,85
2,9	1,33	1,36	27,18
3,2	1,42	1,32	28,60
3,5	1,54	1,30	30,14
3,9	1,67	1,29	31,81
4,2	1,81	1,27	33,62

Finos de Granito con Granalla			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
0,4	0,66	2,60	0,66
0,5	2,59	5,05	3,25
0,6	1,26	5,34	4,51
0,7	1,41	5,43	5,92
0,7	1,54	5,42	7,46
0,8	1,65	5,27	9,11
0,9	1,72	5,00	10,83
1,0	1,75	4,64	12,58
1,1	1,76	4,25	14,34
1,2	1,76	3,87	16,10
1,3	1,74	3,49	17,84
1,4	1,72	3,14	19,56
1,5	1,69	2,81	21,25
1,7	1,67	2,54	22,92
1,8	1,67	2,31	24,59
2,0	1,69	2,12	26,28
2,2	1,72	1,97	28,00
2,4	1,78	1,86	29,78
2,7	1,86	1,77	31,64
2,9	1,97	1,71	33,61
3,2	2,11	1,66	35,72
3,5	2,26	1,62	37,98
3,9	2,41	1,58	40,39
4,2	2,56	1,53	42,95



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Finos de Granito			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
4,7	1,96	1,25	35,58
5,1	2,09	1,22	37,67
5,6	2,22	1,18	39,89
6,2	2,32	1,12	42,21
6,8	2,41	1,06	44,62
7,4	2,46	0,99	47,08
8,2	2,49	0,91	49,57
8,9	2,50	0,83	52,07
9,8	2,47	0,75	54,54
10,8	2,42	0,67	56,96
11,8	2,35	0,59	59,31
13,0	2,28	0,52	61,59
14,3	2,26	0,47	63,85
15,7	2,28	0,43	66,13
17,2	2,35	0,41	68,48
18,9	2,42	0,38	70,90
20,7	2,43	0,35	73,33
22,7	2,34	0,31	75,67
25,0	2,19	0,26	77,86
27,4	2,01	0,22	79,87
30,1	1,88	0,19	81,75
33,0	1,81	0,16	83,56
36,2	1,80	0,15	85,36
39,8	1,80	0,13	87,16
43,7	1,76	0,12	88,92
47,9	1,65	0,10	90,57
52,6	1,51	0,09	92,08
57,8	1,37	0,07	93,45
63,4	1,28	0,06	94,73
69,6	1,24	0,05	95,97
76,4	1,20	0,05	97,17
83,9	1,11	0,04	98,28
92,1	0,90	0,03	99,18

Finos de Granito con Granalla			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
4,7	2,70	1,46	45,65
5,1	2,80	1,39	48,45
5,6	2,88	1,30	51,33
6,2	2,91	1,19	54,24
6,8	2,89	1,08	57,13
7,4	2,83	0,96	59,96
8,2	2,73	0,85	62,69
8,9	2,59	0,73	65,28
9,8	2,42	0,62	67,70
10,8	2,21	0,52	69,91
11,8	2,00	0,43	71,91
13,0	1,83	0,36	73,74
14,3	1,74	0,31	75,48
15,7	1,75	0,28	77,23
17,2	1,84	0,27	79,07
18,9	1,93	0,26	81,00
20,7	1,95	0,24	82,95
22,7	1,86	0,21	84,81
25,0	1,67	0,17	86,48
27,4	1,47	0,14	87,95
30,1	1,31	0,11	89,26
33,0	1,24	0,10	90,50
36,2	1,26	0,09	91,76
39,8	1,32	0,08	93,08
43,7	1,38	0,08	94,46
47,9	1,40	0,07	95,86
52,6	1,37	0,07	97,23
57,8	1,26	0,06	98,49
63,4	0,91	0,04	99,40
69,6	0,46	0,02	99,86
76,4	0,11	0,00	99,97
83,9	0,03	0,00	100,00
92,1	0,00	0,00	100,00



Finos de Granito				Finos de Granito con Granalla			
Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.	Ø canal medida (µm)	% Retenido	Área superf. (%)	% Retenido acum.
101,1	0,56	0,02	99,74	101,1	0,00	0,00	100,00
111,0	0,23	0,01	99,97	111,0	0,00	0,00	100,00
121,8	0,03	0,00	100,00	121,8	0,00	0,00	100,00
133,8	0,00	0,00	100,00	133,8	0,00	0,00	100,00
146,8	0,00	0,00	100,00	146,8	0,00	0,00	100,00
161,2	0,00	0,00	100,00	161,2	0,00	0,00	100,00
176,9	0,00	0,00	100,00	176,9	0,00	0,00	100,00
200,00	0,00	0,00	100,00	200,00	0,00	0,00	100,00

Tabla 34. Granulometría de los finos de granito y los finos de granito con granalla.

Densidad de partículas y la absorción de agua.

En la **tabla 35** se muestra la densidad de las partículas (ρ_a) de los materiales empleados en este estudio, mientras que en la **tabla 36** se muestran las densidades de diferentes residuos empleados.

Muestra	Arena 0,5/1,6 mm	Arena 0/0,5 mm	Humo de sílice	Harina de sílice G40
Densidad (kg/m ³)	2617	2616	2305	2619
	2616	2616	2303	2613
	2617	2615	2300	2607
	2616	2618	2295	2603
	26156	2616	2297	2602
Densidad media	2616	2616	2300	2609
Desviación	0,9	1,1	4,1	6,9

Tabla 35. Densidad aparente.



Muestra	Finos de Mina	Finos del Lavadero	Arena Residual Mina	Finos de Granito	Finos con Granalla	Gruesos de Granito
Densidad (kg/m ³)	2727	2751	2722	2,636	2853	2627
	2725	2750	2717	2635	2852	2628
	2725	2754	2715	2635	2856	2628
	2720	2745	2717	2632	2864	2626
	2719	2741	2713	2629	2857	2625
Densidad media	2723	2748	2717	2633	2856	2627
Desviación	3,5	5,1	3,1	3,1	4,6	1,5

Tabla 36. Densidad aparente de los residuos.

Equivalente de arena.

En la **tabla 37** se muestra los resultados de equivalente de arena, SE(10), que se realizaron a las arenas silíceas y a la arena residual de mina. La obtención del equivalente de arena se obtuvo de la media de dos muestras para cada tipo arena y se redondea al entero más próximo.

Material	Probeta 1		Probeta 2		SE1	SE2	SE	Tiempo
	h11	h21	h12	h22				
Arena Silícea 0,5/1,6 mm	100	96	100	98	96	98	97	20 min
Arena Silícea 0/0,5 mm	100	96	97	95	96	97,9	97	20 min
Arena Residual Mina	137	38	138	40	27,7	29,0	28	20 min
Arena Residual Mina	113	101	113	97	89,4	85,8	88	3 días

Tabla 37. Equivalente de arena.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONSISTENCIA DEL HMARF FRESCO.

En la **tabla 38** se muestran la consistencia del HMARF fresco de las diferentes amasadas realizadas. El ensayo se ha realizado nada más cumplido el tiempo de amasado y la consistencia se midió a los 3 y 5 minutos.



Amasada	Escorrimento [mm]		Fecha
	3 min.	5 min.	
Control	230	260	09/05/2017
Control A	220	230	06/09/2017
Control B	250	270	06/09/2017
Control-SF	220	230	27/02/2018
100% FG	230	250	11/05/2017
70% FG	280	300	11/05/2017
50% FG	300	310	24/05/2017
35% FG	220	270	09/05/2018
100% AM	280	300	24/05/2017
70% AM	250	260	26/05/2017
50% AM	270	290	18/05/2017
35% AM	160	170	03/05/2018
100% FM	270	290	18/05/2017
70% FM	260	270	18/05/2017
50% FM	260	290	22/05/2017
35% FM	190	220	03/05/2018
100% LM	290	310	22/05/2017
70% LM	290	300	22/05/2017
50% LM	280	300	24/05/2017
35% LM	230	280	09/05/018
50% GG	300	310	26/05/2017
100% GG	280	290	26/05/2017
70% GG	260	280	30/05/2017
35% GG	220	240	15/05/2018
100% FGG	190	210	25/01/2018
70% FGG	200	200	25/01/2018
50% FGG	220	220	23/01/2018
35% FGG	220	230	01/06/2018

Tabla 38. Consistencia del HMARF.



RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD DEL HMARF ENDURECIDO.

En las siguientes tablas se muestra la densidad del HMARF para cada una de más amasadas y las fechas en que se han realizado cada ensayo. Para su determinación se utilizaron probetas cilíndricas de 15×30 cm. La altura y el diámetro corresponden a la media de las medidas tomadas sobre tres generatrices situadas a 120°.

Probeta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]	Fecha ensayo
Control 01	299,3	150,0	0,00529	12,933	2440	17/07/2017
Control 02	298,0	150,0	0,00527	12,971	2460	17/07/2017
Control 03	296,7	150,0	0,00524	12,697	2420	17/07/2017
Control-A 01	299,7	150,0	0,00530	12,323	2330	04/10/2017
Control-A 02	300,0	150,0	0,00530	12,595	2380	04/10/2017
Control-A 03	299,3	150,0	0,00529	12,760	2410	04/10/2017
Control-B 01	300,3	150,0	0,00531	12,801	2410	04/10/2017
Control-B 02	300,3	150,0	0,00531	12,618	2380	04/10/2017
Control-B 03	300,0	150,0	0,00530	12,880	2430	04/10/2017
Control-SF 01	303,7	150,3	0,00539	12,372	2300	26/03/2018
Control-SF 02	297,0	150,0	0,00525	12,010	2290	26/03/2018
Control-SF 03	300,3	150,0	0,00531	11,899	2240	26/03/2018

Tabla 39. Densidad del HMARF de control.

Probeta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]	Fecha ensayo
100% FG 01	296,3	149,7	0,00521	12,612	2420	02/06/2017
100% FG 02	297,5	149,5	0,00522	12,705	2430	02/06/2017
100% FG 03	297,7	149,7	0,00524	12,428	2370	02/06/2017
70% FG 01	297,5	150,5	0,00529	12,649	2390	02/06/2017
70% FG 02	299,8	149,7	0,00527	12,631	2390	02/06/2017
70% FG 03	296,7	149,7	0,00522	12,479	2390	02/06/2017
50% FG 01	298,2	149,8	0,00526	12,414	2360	07/06/2017
50% FG 02	300,0	150,0	0,00530	12,514	2360	07/06/2017
50% FG 03	298,7	148,7	0,00518	12,482	2410	07/06/2017
35% FG 01	297,7	149,7	0,00524	12,315	2350	28/05/2018
35% FG 02	301,3	148,3	0,00517	12,336	2390	28/05/2018
35% FG 03	299,0	149,7	0,00526	12,770	2430	28/05/2018

Tabla 40. Densidad del HMARF con FG.



Probeta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]	Fecha ensayo
100% FM 01	300,7	150,0	0,00527	12,449	2360	17/07/2017
100% FM 02	300,0	150,0	0,00525	12,360	2360	17/07/2017
100% FM 03	300,0	150,0	0,00527	12,347	2340	17/07/2017
70% FM 01	302,3	150,0	0,00531	12,637	2380	17/07/2017
70% FM 02	302,0	150,0	0,00530	12,517	2360	17/07/2017
70% FM 03	302,0	150,0	0,00529	12,308	2330	17/07/2017
50% FM 01	300,0	150,0	0,00527	12,355	2340	17/07/2017
50% FM. 02	300,3	150,0	0,00528	12,361	2340	17/07/2017
50% FM 03	299,0	150,0	0,00526	12,565	2390	17/07/2017
35% FM 01	297,7	149,7	0,00521	11,895	2290	28/05/2018
35% FM 02	298,0	150,0	0,00524	11,854	2260	28/05/2018
35% FM 03	300,7	150,0	0,00527	12,221	2320	28/05/2018

Tabla 41. Densidad del HMARF con FM.

Probeta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]	Fecha ensayo
100% LM. 01	300,7	149,2	0,00525	12,425	2360	06/06/2017
100% LM. 02	302,0	149,0	0,00527	12,197	2320	06/06/2017
100% LM 03	299,0	148,8	0,00520	12,190	2340	06/06/2017
70% LM 01	300,2	149,7	0,00528	12,330	2330	06/06/2017
70% LM 02	299,7	149,8	0,00528	12,501	2370	06/06/2017
70% LM 03	300,8	149,8	0,00530	12,269	2310	06/06/2017
50% LM 01	299,7	149,3	0,00525	12,350	2350	07/06/2017
50% LM 02	298,7	149,7	0,00525	12,542	2390	07/06/2017
50% LM 03	300,3	149,8	0,00530	12,497	2360	07/06/2017
35% LM 01	300,7	149,3	0,00523	12,314	2350	28/05/2018
35% LM 02	294,0	149,7	0,00517	11,703	2260	28/05/2018
35% LM 03	297,0	150,0	0,00525	11,757	2240	28/05/2018

Tabla 42. Densidad del HMARF con LM.



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Probeta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]	Fecha ensayo
100% AM 01	297,3	150,0	0,00524	12,271	2340	14/07/2017
100% AM 02	299,7	150,0	0,00526	12,350	2350	14/07/2017
100% AM 03	300,3	150,0	0,00528	12,558	2380	14/07/2017
70% AM 01	302,3	150,0	0,00531	12,716	2390	14/07/2017
70% AM 02	300,3	150,0	0,00526	12,499	2370	14/07/2017
70% AM 03	298,0	150,0	0,00523	12,242	2340	14/07/2017
50% AM 01	302,7	150,0	0,00531	12,511	2350	14/07/2017
50% AM 02	300,0	150,0	0,00528	12,591	2380	14/07/2017
50% AM 03	303,3	150,0	0,00533	12,823	2410	14/07/2017
35% AM 01	299,3	149,3	0,00524	12,561	2400	28/05/2018
35% AM 02	299,0	149,3	0,00524	12,561	2400	28/05/2018
35% AM 03	299,3	148,7	0,00520	12,751	2450	28/05/2018

Tabla 43. Densidad del HMARF con AM.

Probeta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]	Fecha ensayo
100% GG 01	298,7	149,5	0,00524	12,592	2400	09/06/2017
100% GG 02	299,3	150,2	0,00530	12,431	2340	09/06/2017
100% GG 03	301,3	149,7	0,00530	12,327	2330	09/06/2017
70% GG 01	298,8	149,7	0,00526	12,676	2410	09/06/2017
70% GG 02	298,3	149,3	0,00523	12,365	2370	09/06/2017
70% GG 03	300,2	150,5	0,00534	12,555	2350	09/06/2017
50% GG 01	302,3	149,2	0,00528	12,649	2390	08/06/2017
50% GG 02	300,7	149,7	0,00529	12,379	2340	08/06/2017
50% GG 03	300,0	149,7	0,00528	12,268	2320	08/06/2017
35% GG 01	302,7	150,3	0,00537	13,067	2430	04/06/2018
35% GG 02	299,7	150,0	0,00530	12,504	2360	04/06/2018
35% GG 03	295,3	150,0	0,00522	12,538	2400	04/06/2018

Tabla 44. Densidad del HMARF con GG.



Probeta	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]	Fecha ensayo
100% FGG-A 01	299,0	148,7	0,00519	12,918	2490	14/02/2018
100% FGG-A 02	300,7	148,7	0,00522	12,924	2480	14/02/2018
100% FGG-B 01	298,0	149,0	0,00520	13,027	2510	14/02/2018
100% FGG-B 02	299,7	148,7	0,00520	12,966	2490	14/02/2018
70% FGG-A 01	299,0	149,3	0,00524	12,894	2460	14/02/2018
70% FGG-A 02	300,3	148,7	0,00521	12,978	2490	14/02/2018
70% FGG-A 03	299,7	148,7	0,00520	12,826	2470	14/02/2018
70% FGG-B 01	300,3	149,3	0,00526	12,830	2440	14/02/2018
70% FGG-B 02	300,0	148,3	0,00518	12,894	2490	14/02/2018
50% FGG 01	299,7	150,0	0,00530	12,892	2430	14/02/2018
50% FGG 02	300,3	148,7	0,00521	12,855	2470	14/02/2018
35% FGG 01	302,0	149,3	0,00524	12,520	2390	25/06/2018
35% FGG 02	301,0	149,3	0,00525	12,981	2470	25/06/2018
35% FGG 03	301,0	149,7	0,00525	12,600	2400	25/06/2018

Tabla 45. Densidad del HMARF con FGG.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HMARF.

En las siguientes tablas se observan los resultados de los ensayos realizados para determinar la resistencia a compresión de las diferentes amasadas de HMARF que se realizaron sobre probetas cubicas de 10×10×10 cm. En las tablas se indican las fechas del ensayo, la carga máxima aplicada y la resistencia a compresión de cada probeta.



Probeta	Carga Máxima [kN]	R. Compresión [MPa]	Fecha del ensayo
Control 01	1191,2	119,12	06/06/2017
Control 02	1219,2	121,92	06/06/2017
Control 03	1045,5	104,55	06/06/2017
Control 04	1131,3	113,13	06/06/2017
Control 05	879,9	87,99	06/06/2017
Control A 01	1278,5	127,85	04/10/2017
Control A 02	1167,1	116,71	04/10/2017
Control A 03	1157,4	115,74	04/10/2017
Control B 01	1139,4	113,94	04/10/2017
Control B 02	1125,6	112,56	04/10/2017
Control B 03	1183,0	118,30	04/10/2017
Control-SF 01	1120,1	112,01	27/03/2018
Control-SF 02	1133,0	113,30	27/03/2018
Control-SF 03	1008,0	100,80	27/03/2018

Tabla 46. Resistencia a compresión del HMARF de control.

Probeta	Carga Máxima [kN]	R. Compresión [MPa]	Fecha del ensayo
100% FG 01	1049,8	104,98	08/06/2017
100% FG 02	1238,2	123,82	08/06/2017
100% FG 03	1212,0	121,20	08/06/2017
100% FG 04	1415,8	141,58	08/06/2017
70% FG 01	1319,6	131,96	08/06/2017
70% FG 02	1281,7	128,17	08/06/2017
70% FG 03	1228,5	122,85	08/06/2017
50% FG 01	1353,1	135,31	21/06/2017
50% FG 02	1303,4	130,34	21/06/2017
50% FG 03	1280,2	128,02	21/06/2017
35% FG 01	1329,1	132,91	06/06/2018
35% FG 02	1221,4	122,14	06/06/2018
35% FG 03	1283,4	128,34	06/06/2018

Tabla 47. Resistencia a compresión del HMARF con FG.



Probeta	Carga Máxima [kN]	R. Compresión [MPa]	Fecha del ensayo
100% FM 01	1115,3	111,53	15/06/2017
100% FM 02	1126,4	112,64	15/06/2017
100% FM 03	1193,4	119,34	15/06/2017
70% FM 01	1198,2	119,82	15/06/2017
70% FM 02	1145,3	114,53	15/06/2017
70% FM 03	1202,6	120,26	15/06/2017
70% FM-B 01	1231,4	123,14	14/02/2018
70% FM-B 02	1142,8	114,28	14/02/2018
70% FM-B 03	1200,8	120,08	14/02/2018
50% FM 01	1275,0	127,50	19/06/2017
50% FM 02	1244,3	124,43	19/06/2017
50% FM 03	1248,2	124,82	19/06/2017
35% FM 01	1190,2	119,02	31/05/2018
35% FM 02	1272,6	127,26	31/05/2018
35% FM 03	1235,8	123,58	31/05/2018

Tabla 48. Resistencia a compresión del HMARF con FM.

Probeta	Carga Máxima [kN]	R. Compresión [MPa]	Fecha del ensayo
100% LM 01	1217,7	121,77	19/06/2017
100% LM 02	1243,6	124,36	19/06/2017
100% LM 03	1206,7	120,67	19/06/2017
70% LM 01	1235,1	123,51	19/06/2017
70% LM 02	1275,0	127,50	19/06/2017
70% LM 03	1248,7	124,87	19/06/2017
50% LM 01	1338,2	133,82	21/06/2017
50% LM 02	1416,12	141,61	21/06/2017
50% LM 03	1337,7	133,77	21/06/2017
35% LM 01	1009,0	100,90	06/06/2018
35% LM 02	1008,3	100,83	06/06/2018
35% LM 03	1168,6	116,86	06/06/2018

Tabla 49. Resistencia a compresión del HMARF con LM.



Probeta	Carga Máxima [kN]	R. Compresión [MPa]	Fecha del ensayo
100% AM 01	1309,0	130,90	21/06/2017
100% AM 02	1284,6	128,46	21/06/2017
100% AM 03	1318,6	131,86	21/06/2017
100% AM-B 01	1378,4	137,84	20/02/2018
100% AM-B 02	1403,5	140,35	20/02/2018
70% AM 01	1297,4	129,74	23/06/2017
70% AM 02	1292,6	129,26	23/06/2017
70% AM 03	1341,9	134,19	23/06/2017
70% AM-B 01	1452,0	145,20	20/02/2018
70% AM-B 02	1399,9	139,99	20/02/2018
50% AM 01	1237,1	123,71	15/06/2017
50% AM 02	1338,6	133,86	15/06/2017
50% AM 03	1102,8	110,28	15/06/2017
35% AM 01	1392,0	139,20	31/05/2018
35% AM 02	1491,0	149,10	31/05/2018
35% AM 03	1353,4	135,34	31/05/2018

Tabla 50. Resistencia a compresión del HMARF con AM.

Probeta	Carga Máxima [kN]	R. Compresión [MPa]	Fecha del ensayo
50% GG 01	1266,0	126,60	23/06/2017
50% GG 02	1257,2	125,72	23/06/2017
50% GG 03	1297,6	129,76	23/06/2017
100% GG 01	1346,2	134,62	23/06/2017
100% GG 02	1306,2	130,62	23/06/2017
100% GG 03	1268,5	126,85	23/06/2017
70% GG 01	1353,2	135,32	27/06/2017
70% GG 02	1366,4	136,64	27/06/2017
70% GG 03	1318,1	131,81	27/06/2017
35% GG 01	1350,3	135,03	13/05/2018
35% GG 02	1395,2	139,52	13/05/2018
35% GG 03	1503,3	150,33	13/05/2018

Tabla 51. Resistencia a compresión del HMARF con GG.



Probeta	Carga Máxima [kN]	R. Compresión [MPa]	Fecha del ensayo
100% FGG-A 01	1423,4	142,34	14/02/2018
100% FGG-A 02	1248,4	124,84	14/02/2018
100% FGG-A 03	1444,7	144,47	16/02/2018
100% FGG-A 01	1233,4	123,34	22/02/2018
100% FGG-A 02	1359,5	135,95	22/02/2018
100% FGG-A 03	1270,3	127,03	22/02/2018
70% FGG-A 01	1525,7	152,57	14/02/2018
70% FGG-A 02	1498,3	149,83	14/02/2018
70% FGG-A 03	1469,1	146,91	16/02/2018
70% FGG-A 01	1342,6	134,26	22/02/2018
70% FGG-A 02	1382,1	138,21	22/02/2018
70% FGG-A 03	1289,6	128,96	22/02/2018
50% FGG 01	1251,3	125,13	20/02/2018
50% FGG 02	1347,5	134,75	20/02/2018
50% FGG 03	1309,1	130,91	20/02/2018
35% FGG 01	1234,4	123,44	28/06/2018
35% FGG 02	1236,8	123,68	28/06/2018
35% FGG 03	1347,5	134,75	28/06/2018

Tabla 52. Resistencia a compresión del HMARF con FGG.



RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HMARF.

A continuación, se observan los resultados correspondientes al ensayo del módulo de elasticidad, realizados sobre probeta cilíndrica de 15×30 cm, de todas las amasadas de HMARF. Además, se indican las cargas correspondientes al último ciclo del ensayo y la media de los desplazamientos registrados.

Probeta	Carga superior [kN]	Carga inferior [kN]	Despl. superior [mm]	Despl. inferior [mm]	Módulo Elástico [GPa]	Fecha del ensayo
Control 01	605,5	9,0	0,117	0,001	43,5	06/06/2017
Control 02	604,5	9,5	0,110	-0,002	45,1	06/06/2017
Control 03	605,1	8,4	0,134	-0,011	35,1	06/06/2017
Control-A 02	613,7	8,7	0,118	0,001	43,9	04/10/2017
Control-A 03	612,9	8,9	0,112	0,001	46,0	04/10/2017
Control-A 01	612,4	8,1	0,122	0,000	42,2	04/10/2017
Control-B 01	588,5	9,0	0,105	-0,002	46,2	04/10/2017
Control-B 02	588,3	8,7	0,108	-0,001	45,6	04/10/2017
Control-B 03	587,6	9,1	0,103	-0,002	47,0	04/10/2017
Control-SF 01	550,7	9,7	0,102	-0,001	45,0	27/03/2018
Control-SF 02	551,5	8,9	0,105	-0,002	43,0	27/03/2018
Control-SF 03	550,9	8,7	0,108	-0,001	42,2	27/03/2018

Tabla 53. Módulo de elasticidad del HMARF de control.

Probeta	Carga superior [kN]	Carga inferior [kN]	Despl. superior [mm]	Despl. inferior [mm]	Módulo Elástico [GPa]	Fecha del ensayo
100% FG 01	634,4	8,5	0,123	0,001	43,4	08/06/2017
100% FG 02	634,5	8,5	0,117	-0,001	45,2	08/06/2017
100% FG 03	633,5	8,5	0,123	-0,001	42,8	08/06/2017
70% FG 01	662,1	8,9	0,117	-0,002	47,0	08/06/2017
70% FG 02	661,7	9,4	0,128	0,000	43,4	08/06/2017
70% FG 03	663,1	8,4	0,126	0,000	44,1	08/06/2017
50% FG 01	683,3	8,6	0,135	0,001	42,7	21/06/2017
50% FG 02	682,6	8,4	0,134	0,000	42,9	21/06/2017
50% FG 03	682,5	9,2	0,135	0,001	42,8	21/06/2017
35% FG 01	-	-	-	-	-	06/06/2018
35% FG 02	-	-	-	-	-	06/06/2018
35% FG 03	663,2	9,3	0,124	-0,001	44,4	06/06/2018

Tabla 54. Módulo de elasticidad del HMARF con FG.



Probeta	Carga superior [kN]	Carga inferior [kN]	Despl. superior [mm]	Despl. inferior [mm]	Módulo Elástico [GPa]	Fecha del ensayo
100% FM 01	585,6	9,0	0,115	0,001	42,9	15/06/2017
100% FM 02	585,55	8,4	0,118	-0,002	41,2	15/06/2017
100% FM 03	584,0	9,2	0,114	-0,002	42,4	15/06/2017
70% FM 01	606,0	8,9	0,122	0,005	43,3	15/06/2017
70% FM 02	606,8	8,9	0,119	-0,001	42,5	15/06/2017
70% FM 03	606,0	8,9	0,121	-0,001	41,5	15/06/2017
50% FM 01	649,4	9,3	0,130	-0,002	41,5	19/06/2017
50% FM 02	650,2	8,7	0,133	0,001	41,3	19/06/2017
50% FM 03	649,1	9,0	0,126	0,001	43,5	19/06/2017
35% FM 01	636,9	9,2	0,143	0,000	37,1	31/05/2018
35% FM 02	637,7	8,7	0,145	0,001	37,2	31/05/2018
35% FM 03	637,2	7,8	0,138	0,005	38,9	31/05/2018

Tabla 55. Módulo de elasticidad del HMARF con FM.

Probeta	Carga superior [kN]	Carga inferior [kN]	Despl. superior [mm]	Despl. inferior [mm]	Módulo Elástico [GPa]	Fecha del ensayo
100% LM 01	630,6	9,2	0,128	0,001	41,7	19/06/2017
100% LM 02	630,1	9,4	0,131	0,000	40,4	19/06/2017
100% LM 03	630,5	8,9	0,136	0,000	38,9	19/06/2017
70% LM 01	649,5	9,2	0,130	0,001	42,1	19/06/2017
70% LM 02	649,4	8,7	0,129	0,001	42,5	19/06/2017
70% LM 03	648,2	8,1	0,130	0,001	42,0	19/06/2017
50% LM 01	714,8	8,7	0,139	-0,002	42,7	21/06/2017
50% LM 02	713,3	9,6	0,138	-0,001	43,1	21/06/2017
50% LM 03	714,1	8,7	0,138	-0,001	43,1	21/06/2017
35% LM 01	536,1	8,1	0,109	-0,003	40,0	07/06/2018
35% LM 02	535,1	9,0	0,120	0,000	37,1	06/06/2018
35% LM 03	536,1	9,1	0,119	-0,001	37,4	07/06/2018

Tabla 56. Módulo de elasticidad del HMARF con LM.



Probeta	Carga superior [kN]	Carga inferior [kN]	Despl. superior [mm]	Despl. inferior [mm]	Módulo Elástico [GPa]	Fecha del ensayo
100% AM 01	677,8	9,6	0,133	-0,001	42,6	21/06/2017
100% AM 02	677,6	9,0	0,136	0,000	41,9	21/06/2017
100% AM 03	678,8	8,5	0,135	0,001	42,5	21/06/2017
70% AM 01	681,8	8,7	0,131	-0,001	43,4	23/06/2017
70% AM 02	682,0	8,8	0,136	0,001	42,3	23/06/2017
70% AM 03	681,8	8,9	0,141	0,005	42,2	23/06/2017
50% AM 01	631,6	8,7	0,120	-0,001	43,7	15/06/2017
50% AM 02	633,2	8,3	0,117	-0,004	44,0	15/06/2017
50% AM 03	632,0	9,6	0,122	-0,001	43,0	15/06/2017
35% AM 01	742,0	9,2	0,145	-0,001	42,8	31/05/2018
35% AM 02	742,1	8,7	0,149	0,002	42,4	31/05/2018
35% AM 03	742,3	8,4	0,134	-0,002	46,1	31/05/2018

Tabla 57. Módulo de elasticidad del HMARF con AM.

Probeta	Carga superior [kN]	Carga inferior [kN]	Despl. superior [mm]	Despl. inferior [mm]	Módulo Elástico [GPa]	Fecha del ensayo
100% GG 01	680,9	8,5	0,136	0,002	42,8	23/06/2017
100% GG 02	680,0	9,8	0,141	0,002	41,1	23/06/2017
100% GG 03	680,4	9,2	0,142	0,002	40,7	23/06/2017
70% GG 01	703,2	9,3	0,134	0,002	44,5	27/06/2017
70% GG 02	701,7	9,5	0,142	0,002	42,1	27/06/2017
70% GG 03	703,6	9,2	0,139	0,002	43,0	27/06/2017
50% GG 01	660,4	9,2	0,123	-0,002	44,2	23/06/2017
50% GG 02	660,9	9,5	0,132	0,002	42,4	23/06/2017
50% GG 03	661,0	9,5	0,136	0,003	41,7	23/06/2017
35% GG 01	746,2	9,4	0,145	0,002	43,7	13/05/2018
35% GG 02	746,5	8,4	0,150	0,001	42,0	13/05/2018
35% GG 03	747,5	8,1	0,147	-0,001	42,7	13/05/2018

Tabla 58. Módulo de elasticidad del HMARF con GG.



Probeta	Carga superior [kN]	Carga inferior [kN]	Despl. superior [mm]	Despl. inferior [mm]	Módulo Elástico [GPa]	Fecha del ensayo
100% FGG-A 01	753,1	8,2	0,145	-0,001	43,6	14/02/2018
100% FGG-A 02	756,0	7,0	0,142	0,001	45,1	14/02/2018
100% FGG-A 03	753,4	8,7	0,142	0,000	44,7	14/02/2018
100% FGG-B 01	669,6	9,2	0,135	-0,001	41,5	22/02/2018
100% FGG-B 02	668,0	8,1	0,135	-0,001	41,3	22/02/2018
70% FGG-A 01	792,5	8,1	0,153	0,001	43,9	14/02/2018
70% FGG-A 02	792,9	8,7	0,148	0,002	45,4	14/02/2018
70% FGG-B 01	669,8	8,6	0,136	-0,002	41,0	22/02/2018
70% FGG-B 02	698,9	8,2	0,136	0,001	43,3	22/02/2018
50% FGG 01	677,3	9,1	0,130	0,001	43,8	20/02/2018
50% FGG 02	678,2	8,1	0,130	-0,002	43,3	20/02/2018
35% FGG 01	659,6	8,4	0,131	0,001	42,5	28/06/2018
35% FGG 02	660,3	9,2	0,125	0,001	44,7	28/06/2018
35% FGG 03	660,3	9,0	0,131	0,002	43,0	28/06/2018

Tabla 59. Módulo de elasticidad del HMARF con FGG.

RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN.

En las tablas que se exponen a continuación se muestran los puntos clave que se obtuvieron de las curvas tensión-flecha, necesarios para determinar las resistencias a flexión y tracción de todas las amasadas realizadas con HMARF, mientras que en las figuras que están a continuación se pueden observar las curvas tensión-flecha obtenidas en cada uno de los ensayos de flexotracción.

Probeta	σ_1 [MPa]	δ_1 [mm]	σ_2 [MPa]	δ_2 [mm]	σ_3 [MPa]	δ_3 [mm]	σ_4 [MPa]	δ_4 [mm]	δ_4^* [mm]
Control 01	19,92	0,231	21,92	0,475	22,10	0,486	17,68	1,644	1,693
Control 02	15,25	0,101	18,16	0,227	21,56	0,637	17,25	1,921	2,063
Control 03	13,74	0,093	14,39	0,186	16,20	0,480	12,96	1,986	2,002
Control-A 01	15,05	0,101	17,62	0,223	23,63	0,797	18,90	2,080	2,301
Control-A 02	12,85	0,109	17,05	0,267	17,22	0,281	13,78	1,679	1,730
Control-A 03	13,30	0,108	13,52	0,201	13,69	0,215	10,95	1,314	1,432
Control-B 01	13,54	0,093	13,62	0,177	15,81	0,354	12,65	1,938	2,082
Control-B 02	15,58	0,104	18,63	0,233	22,00	0,615	17,60	1,771	1,959
Control-B 03	14,93	0,105	19,83	0,261	23,70	0,629	18,96	1,844	1,966

Tabla 60. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF de control.



Probeta	σ_1 [MPa]	δ_1 [mm]	σ_2 [MPa]	δ_2 [mm]	σ_3 [MPa]	δ_3 [mm]	σ_4 [MPa]	δ_4 [mm]	δ_4^* [mm]
100% FG 01	20,51	0,264	22,09	0,546	21,75	0,446	17,40	1,923	1,931
100% FG 02	14,24	0,111	17,18	0,251	19,30	0,540	15,44	1,720	1,817
100% FG 03	15,21	0,101	19,71	0,246	21,87	0,437	17,49	1,876	2,023
70% FG 01	12,71	0,067	16,09	0,160	20,02	0,456	16,02	1,778	1,875
70% FG 02	15,43	0,110	19,29	0,257	24,37	0,662	19,50	1,488	1,488
70% FG 03	15,93	0,125	19,72	0,291	22,79	0,597	18,23	2,016	2,060
50% FG 01	14,00	0,110	16,25	0,241	16,35	0,249	13,08	1,099	1,203
50% FG 02	13,93	0,091	17,13	0,223	17,51	0,247	14,01	1,330	1,426
50% FG 03	15,71	0,112	18,25	0,244	18,38	0,348	14,70	1,625	1,771
35% FG 01	19,45	0,267	26,46	0,683	25,67	0,579	20,54	1,047	1,093
35% FG 02	18,12	0,190	23,19	0,460	23,95	0,500	19,16	1,472	1,493
35% FG 03	15,06	0,197	21,17	0,517	21,30	0,524	17,04	1,475	1,543

Tabla 61. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con FG.

Probeta	σ_1 [MPa]	δ_1 [mm]	σ_2 [MPa]	δ_2 [mm]	σ_3 [MPa]	δ_3 [mm]	σ_4 [MPa]	δ_4 [mm]	δ_4^* [mm]
100% FM 01	13,35	0,097	16,78	0,228	17,52	0,268	14,01	1,742	1,773
100% FM 02	14,99	0,114	18,08	0,259	20,27	0,450	16,22	1,535	1,600
100% FM 03	14,35	0,088	16,78	0,186	18,09	0,310	14,48	1,502	1,565
70% FM 01	14,74	0,112	17,35	0,248	18,05	0,376	14,44	1,504	1,609
70% FM 02	14,50	0,100	16,50	0,215	18,11	0,395	14,49	1,654	1,786
70% FM 03	14,10	0,105	17,36	0,241	18,19	0,425	14,55	1,590	1,600
70% FM-B 01	14,98	0,113	17,33	0,244	18,92	0,427	15,14	1,249	1,269
70% FM-B 02	13,71	0,111	17,03	0,255	18,22	0,386	14,58	-	-
70% FM-B 03	14,30	0,111	17,17	0,248	19,65	0,479	15,72	1,843	1,906
50% FM 01	15,86	0,118	18,17	0,254	19,53	0,409	15,63	1,723	1,851
50% FM 02	16,92	0,123	19,49	0,268	21,40	0,406	17,12	1,758	1,814
50% FM 03	15,02	0,095	19,25	0,229	21,60	0,435	17,28	1,651	1,744
35% FM 01	17,41	0,287	22,08	0,679	21,47	0,524	17,18	1,235	1,315
35% FM 02	15,98	0,322	18,82	0,711	18,26	0,548	14,60	1,330	1,378
35% FM 03	11,77	0,190	9,91	0,305	11,69	0,166	9,35	0,323	0,348

Tabla 62. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con FM.



Probeta	σ_1 [MPa]	δ_1 [mm]	σ_2 [MPa]	δ_2 [mm]	σ_3 [MPa]	δ_3 [mm]	σ_4 [MPa]	δ_4 [mm]	δ_4^* [mm]
100% LM 01	15,64	0,099	19,69	0,233	21,39	0,347	17,11	1,623	1,675
100% LM 02	13,68	0,097	15,20	0,199	15,74	0,245	12,59	1,544	1,568
100% LM 03	12,03	0,084	14,69	0,189	16,41	0,439	13,13	1,976	2,082
70% LM 01	14,75	0,113	18,20	0,262	20,89	0,592	16,71	1,739	1,899
70% LM 02	12,23	0,095	15,53	0,220	15,70	0,285	12,56	1,620	1,620
70% LM 03	16,15	0,130	20,29	0,304	20,82	0,388	16,65	1,838	1,933
50% LM 01	12,05	0,082	15,52	0,195	17,91	0,553	14,33	2,027	2,076
50% LM 02	14,56	0,100	17,06	0,219	18,69	0,347	14,96	1,384	1,483
50% LM 03	13,85	0,093	17,07	0,216	19,49	0,531	15,60	1,767	1,788
35% LM 01	16,55	0,288	21,16	0,691	20,66	0,570	16,53	1,630	1,728
35% LM 02	15,75	0,224	21,82	0,581	21,46	0,549	17,17	1,619	1,726
35% LM 03	15,45	0,195	20,67	0,491	21,23	0,610	16,98	1,865	1,947

Tabla 63. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con LM.

Probeta	σ_1 [MPa]	δ_1 [mm]	σ_2 [MPa]	δ_2 [mm]	σ_3 [MPa]	δ_3 [mm]	σ_4 [MPa]	δ_4 [mm]	δ_4^* [mm]
100% AM 01	16,93	0,298	18,05	0,596	17,56	0,413	14,05	1,417	1,490
100% AM 02	14,47	0,096	14,54	0,187	16,54	0,330	13,23	1,412	1,491
100% AM 03	15,05	0,105	19,18	0,251	19,53	0,269	15,63	1,333	1,418
100% AM-B 01	17,93	0,107	20,35	0,228	20,49	0,243	16,39	0,858	0,934
100% AM-B 02	14,76	0,101	16,74	0,215	17,55	0,371	14,04	1,177	1,229
100% AM-B 03	16,30	0,097	16,96	0,210	18,01	0,292	14,41	1,584	1,590
70% AM 01	16,05	0,104	20,00	0,243	23,25	0,546	18,60	1,681	1,752
70% AM 02	15,99	0,105	19,88	0,248	22,58	0,457	18,07	1,616	1,762
70% AM 03	14,77	0,109	17,43	0,241	19,26	0,342	15,41	1,719	1,791
70% AM-B 01	18,85	0,174	21,89	0,382	23,47	0,487	18,78	1,487	1,571
70% AM-B 02	16,39	0,102	19,17	0,224	20,77	0,354	16,62	1,394	1,523
70% AM-B 03	16,71	0,120	19,37	0,261	19,60	0,306	15,68	1,396	1,408
50% AM 01	14,21	0,101	18,64	0,245	20,57	0,319	16,46	1,769	1,794
50% AM 02	14,97	0,105	19,87	0,259	22,89	0,313	18,31	1,763	1,876
50% AM 03	14,58	0,104	16,85	0,226	18,94	0,312	15,16	1,762	1,854
35% AM 01	11,72	0,121	13,35	0,244	13,18	0,228	10,54	0,719	0,723
35% AM 02	13,19	0,121	12,44	0,339	13,28	0,121	10,62	0,650	0,664
35% AM 03	12,80	0,116	15,35	0,250	15,57	0,270	12,46	0,852	0,926

Tabla 64. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con AM.



Probeta	σ_1 [MPa]	δ_1 [mm]	σ_2 [MPa]	δ_2 [mm]	σ_3 [MPa]	δ_3 [mm]	σ_4 [MPa]	δ_4 [mm]	δ_4^* [mm]
100% GG 01	14,39	0,117	17,91	0,273	20,12	0,509	16,10	1,672	1,752
100% GG 02	15,91	0,117	18,96	0,261	22,03	0,492	17,63	1,554	1,650
100% GG 03	14,39	0,117	17,91	0,273	19,99	0,509	16,00	1,672	1,789
70% GG 01	16,33	0,110	20,24	0,254	23,95	0,614	19,16	2,023	2,059
70% GG 02	16,17	0,121	21,15	0,298	22,36	0,387	17,89	1,602	1,733
70% GG 03	15,15	0,115	20,13	0,288	21,84	0,438	17,47	1,735	1,870
50% GG 01	14,46	0,105	18,36	0,252	19,45	0,304	15,56	1,754	1,754
50% GG 02	13,58	0,097	18,51	0,247	18,36	0,307	14,69	1,757	1,813
50% GG 03	15,12	0,109	18,98	0,257	19,90	0,309	15,92	1,759	1,802
35% GG 01	19,31	0,277	26,96	0,726	25,86	0,737	20,69	1,407	1,483
35% GG 02	19,08	0,244	24,77	0,590	24,18	0,508	19,34	1,068	1,125
35% GG 03	18,51	0,157	24,23	0,380	24,54	0,478	19,63	1,366	1,445

Tabla 65. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con GG.

Probeta	σ_1 [MPa]	δ_1 [mm]	σ_2 [MPa]	δ_2 [mm]	σ_3 [MPa]	δ_3 [mm]	σ_4 [MPa]	δ_4 [mm]	δ_4^* [mm]
100% FGG-A 01	14,42	0,101	17,36	0,227	19,74	0,371	15,79	1,966	2,010
100% FGG-A 02	13,70	0,103	16,52	0,234	16,23	0,167	12,99	1,696	1,750
100% FGG-A 03	13,40	0,088	16,13	0,198	16,10	0,196	12,88	1,480	1,486
100% FGG-B 01	14,01	0,113	18,25	0,268	19,19	0,352	15,35	1,478	1,552
100% FGG-B 02	15,02	0,105	19,02	0,242	21,42	0,482	17,14	1,849	1,890
100% FGG-B 03	16,53	0,118	19,99	0,268	23,85	0,661	19,08	1,970	2,006
70% FGG-A 01	13,89	0,094	16,53	0,210	16,95	0,374	13,56	1,365	1,455
70% FGG-A 02	15,25	0,114	17,62	0,246	20,52	0,593	16,42	1,673	1,850
70% FGG-A 03	14,89	0,101	18,35	0,232	21,56	0,503	17,25	1,707	1,854
70% FGG-B 01	14,35	0,104	16,26	0,213	17,81	0,454	14,25	1,436	1,499
70% FGG-B 02	13,83	0,102	14,85	0,211	16,98	0,412	13,59	1,415	1,488
70% FGG-B 03	14,89	0,103	18,54	0,240	20,06	0,402	16,05	1,469	1,548
50% FGG 01	14,08	0,103	17,61	0,246	19,37	0,457	15,50	1,371	1,451
50% FGG 02	14,73	0,099	17,91	0,234	19,92	0,445	15,94	1,612	1,619
50% FGG 03	13,53	0,109	13,52	0,203	15,40	0,430	12,32	1,528	1,644
35% FGG 01	20,31	0,410	25,82	0,974	25,08	0,773	20,07	1,734	1,883
35% FGG 02	20,23	0,292	25,75	0,697	25,04	0,571	20,03	1,434	1,463
35% FGG 03	18,36	0,298	25,14	0,767	24,62	0,648	19,70	1,382	1,443

Tabla 66. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con FGG.

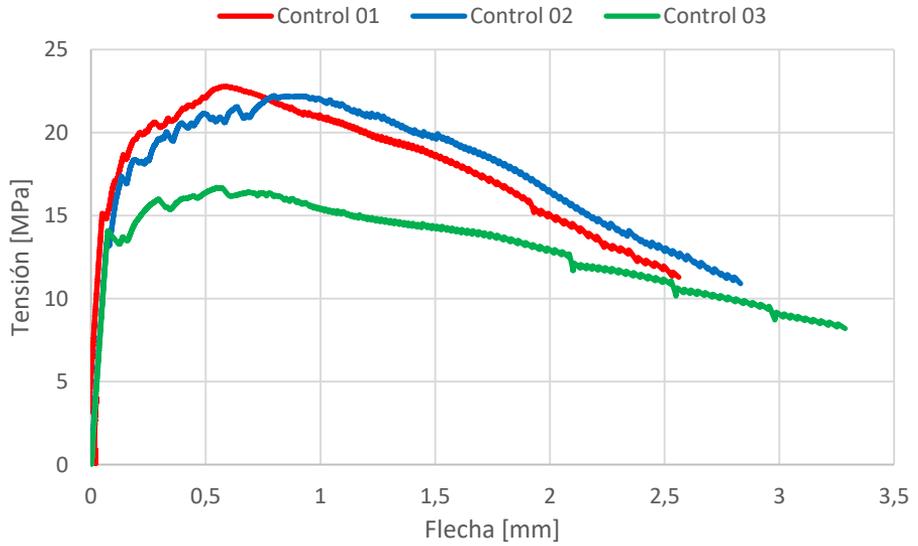


Figura 158. Curvas tensión-flecha del HMARF de control.

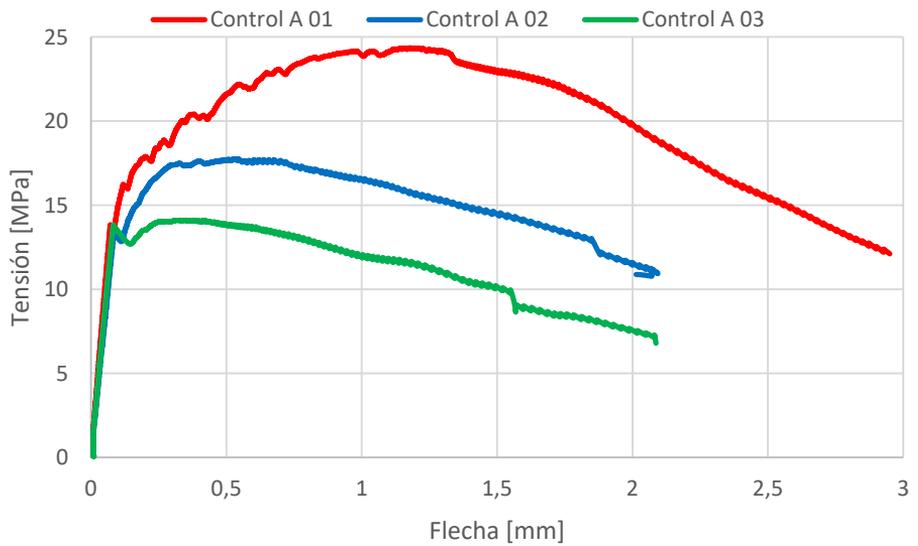


Figura 159. Curvas tensión-flecha del HMARF de control A.

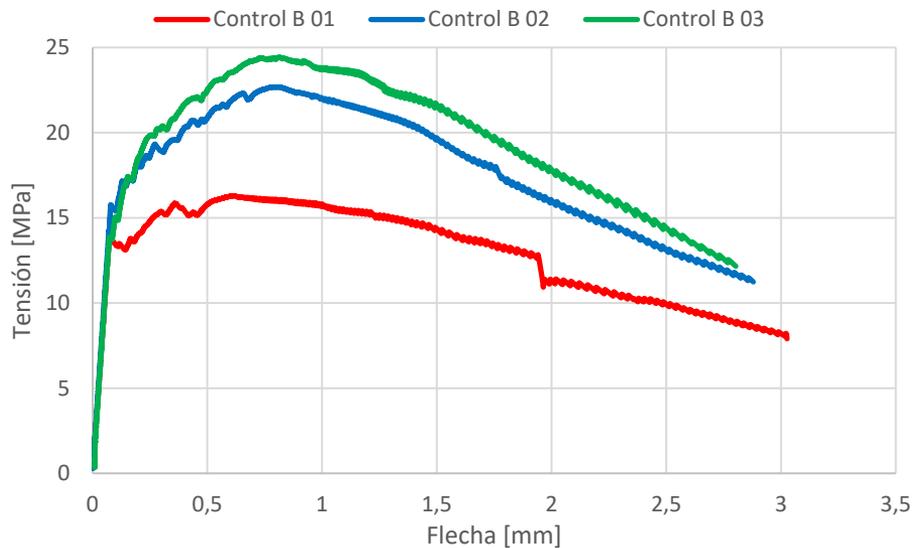


Figura 160. Curvas tensión-flecha del HMARF de control B.

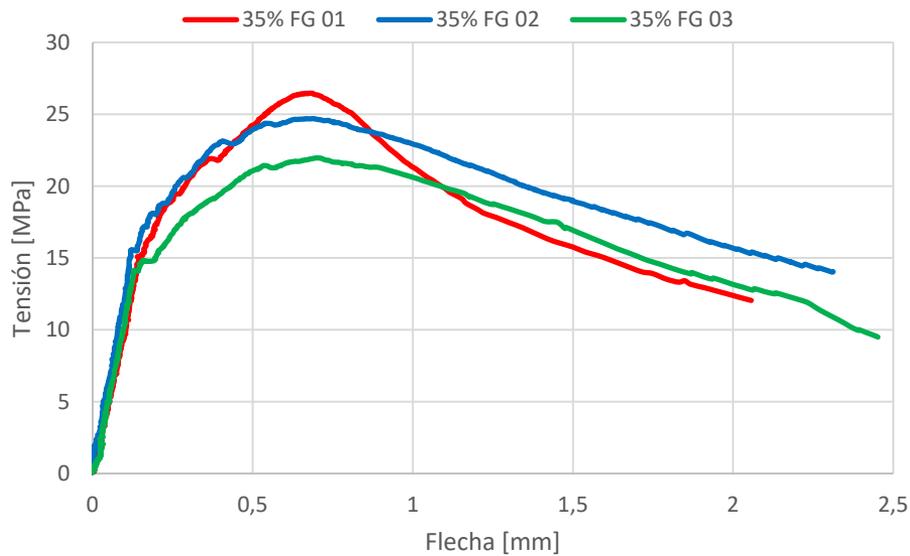


Figura 161. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% FG.

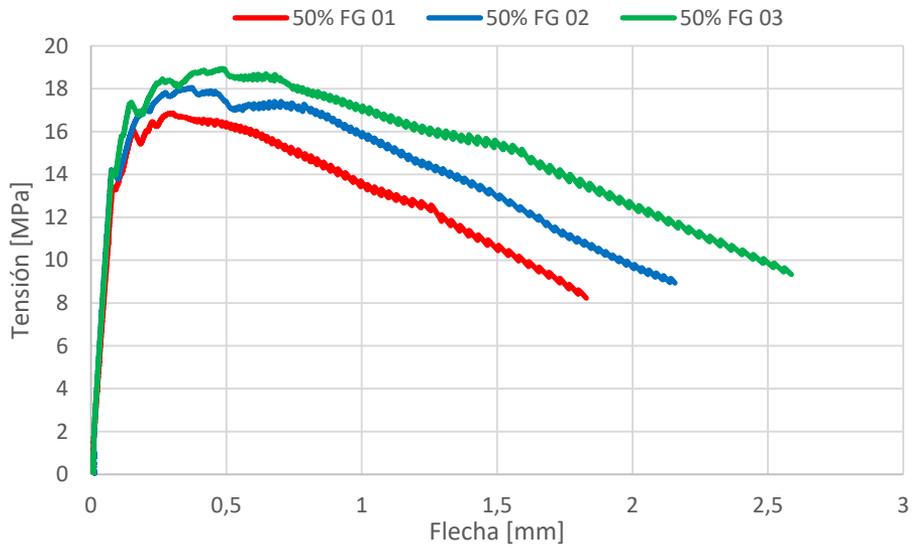


Figura 162. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% FG.

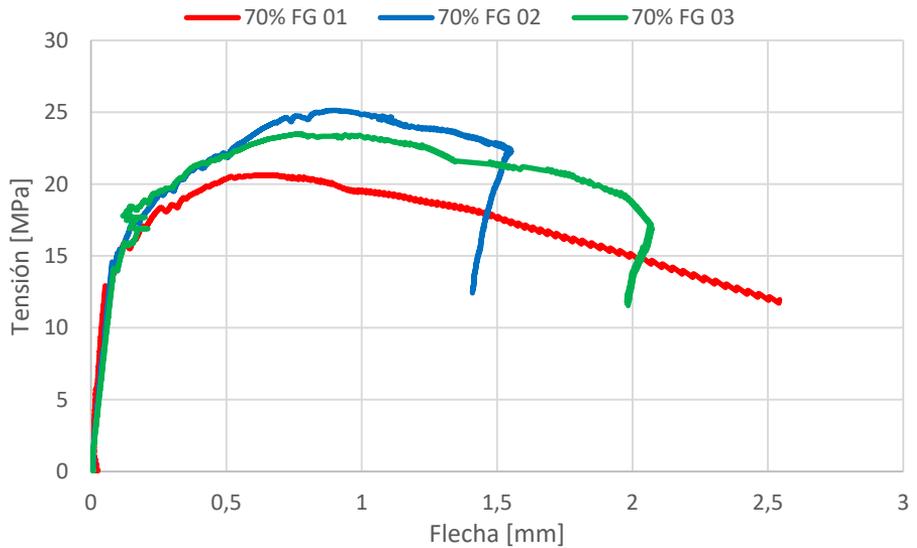


Figura 163. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FG.

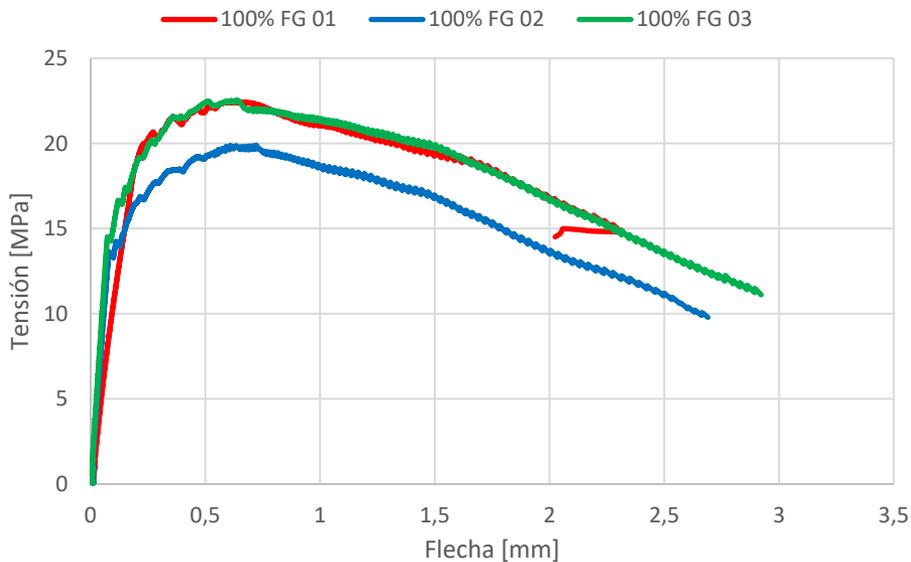


Figura 164. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FG.

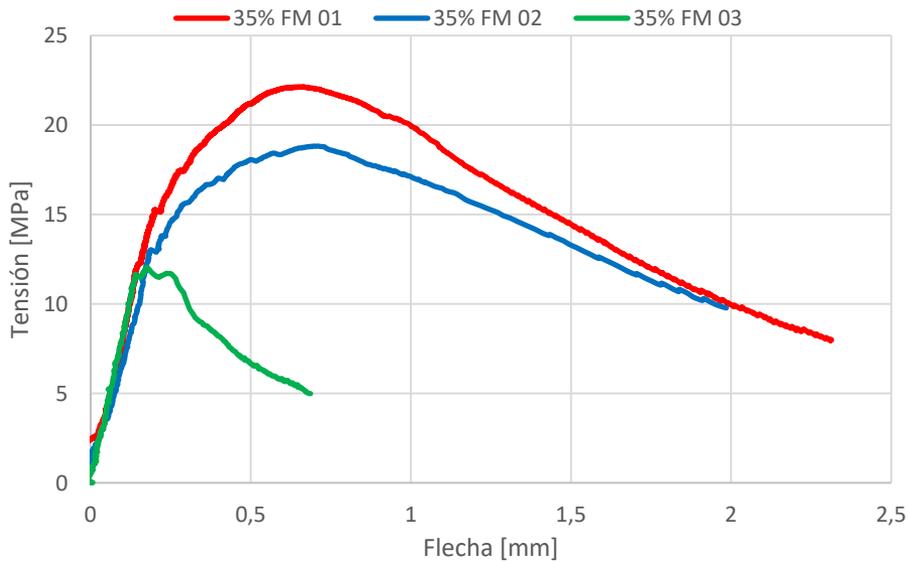


Figura 165. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% FM.

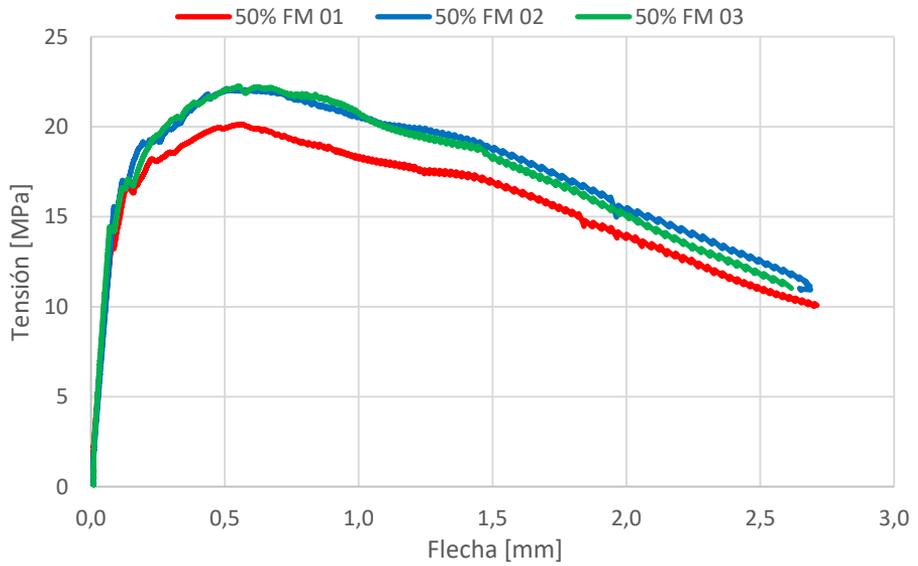


Figura 166. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% FM.

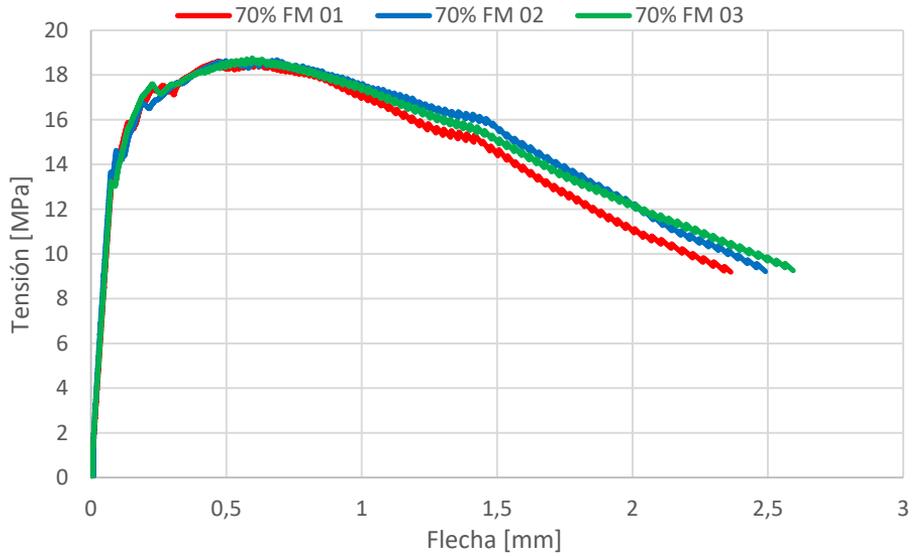


Figura 167. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FM (A).

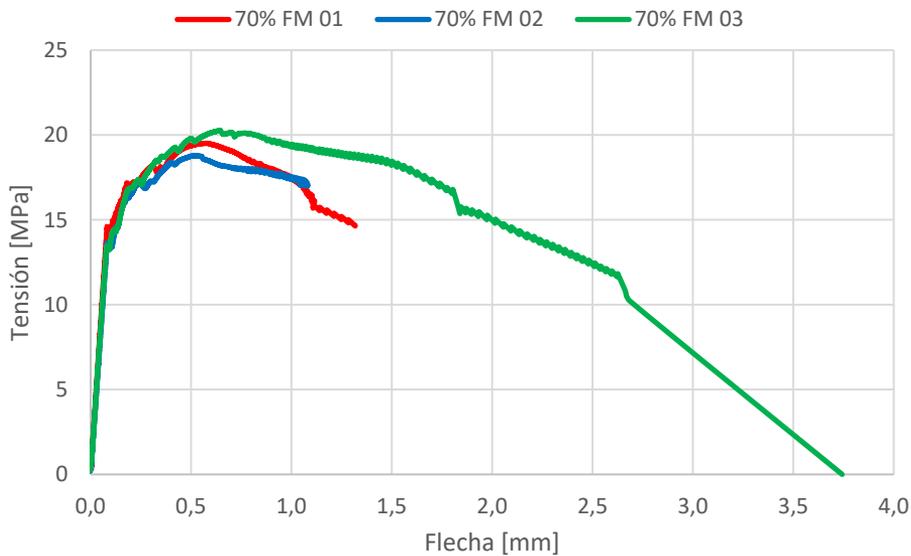


Figura 168. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FM (B).

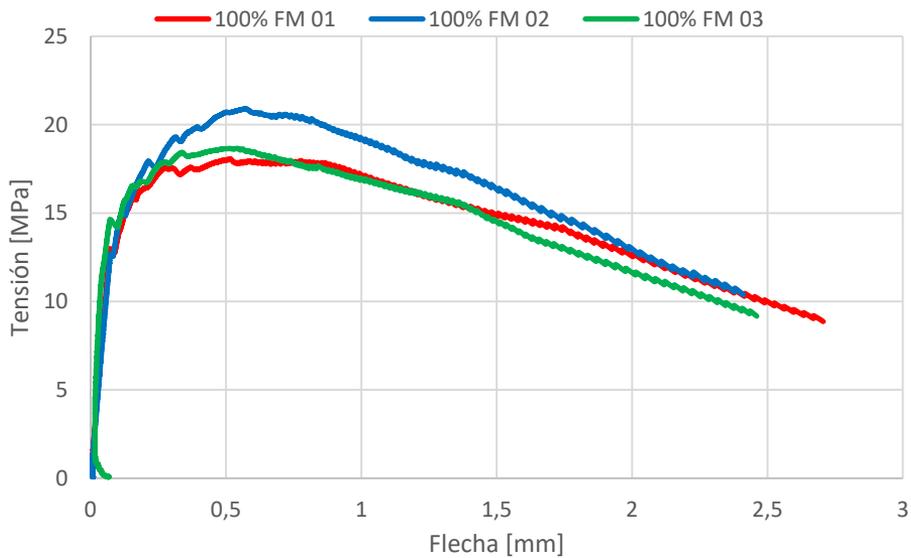


Figura 169. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FM.

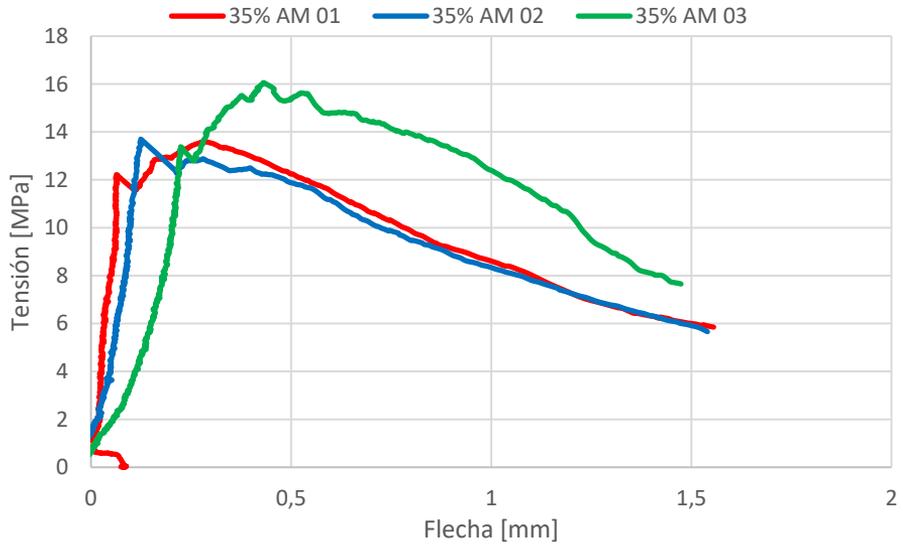


Figura 170. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% AM.

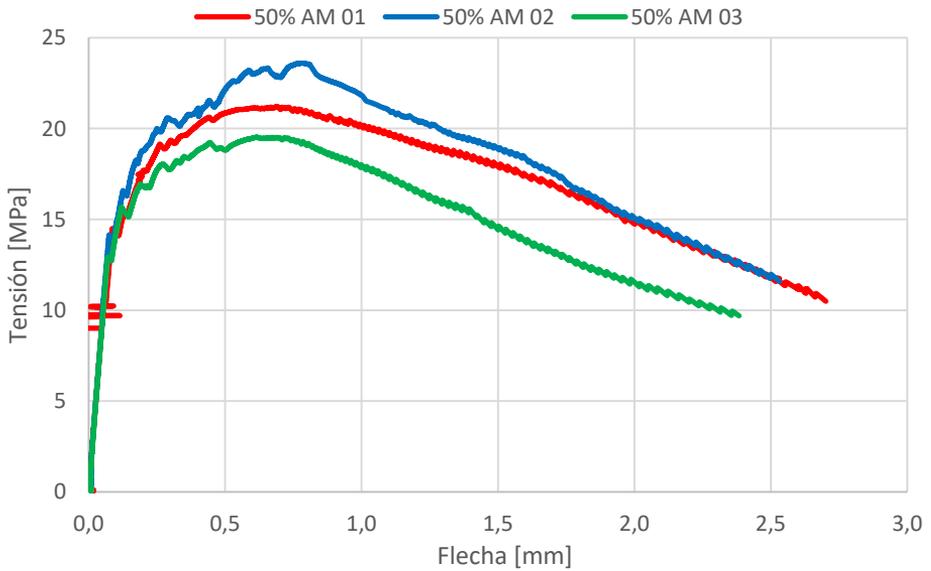


Figura 171. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% AM.

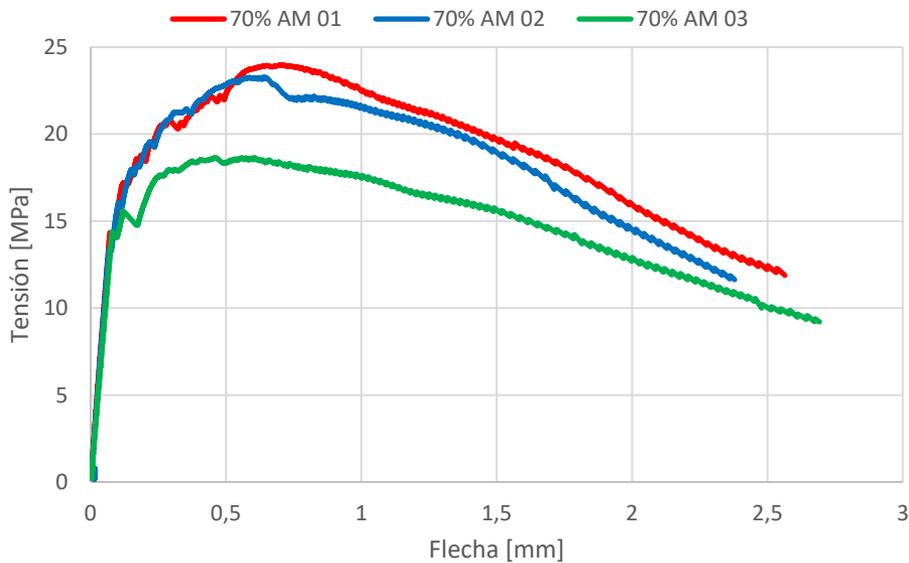


Figura 172. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% AM (A).

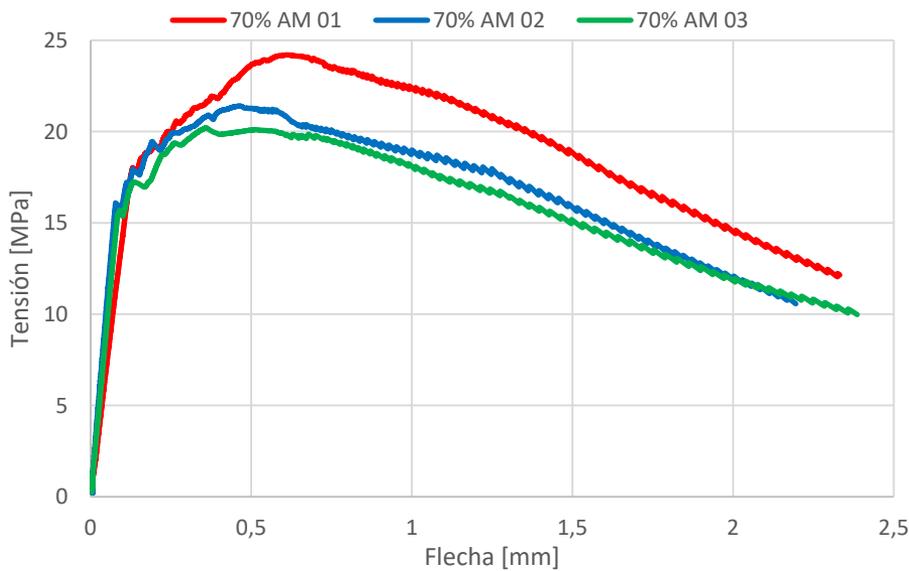


Figura 173. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% AM (B).

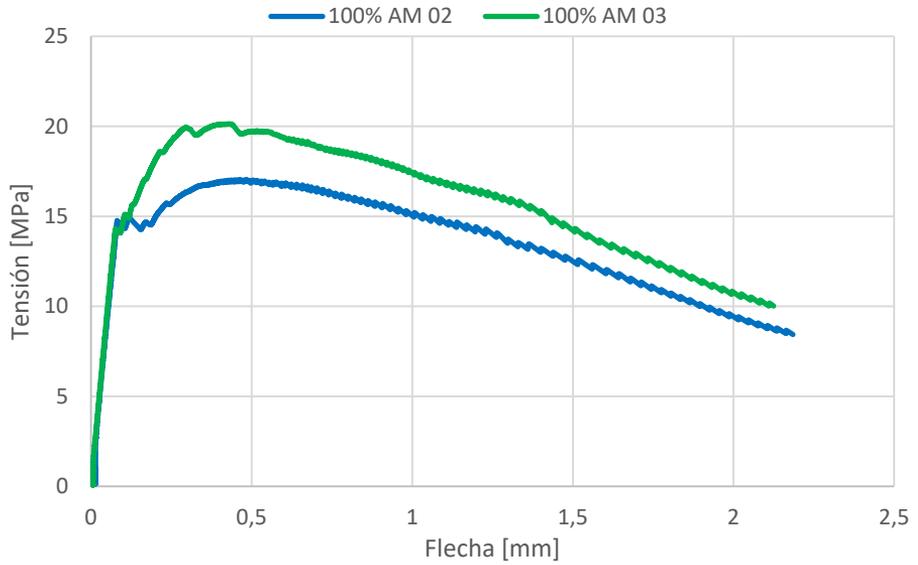


Figura 174. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% AM (A).

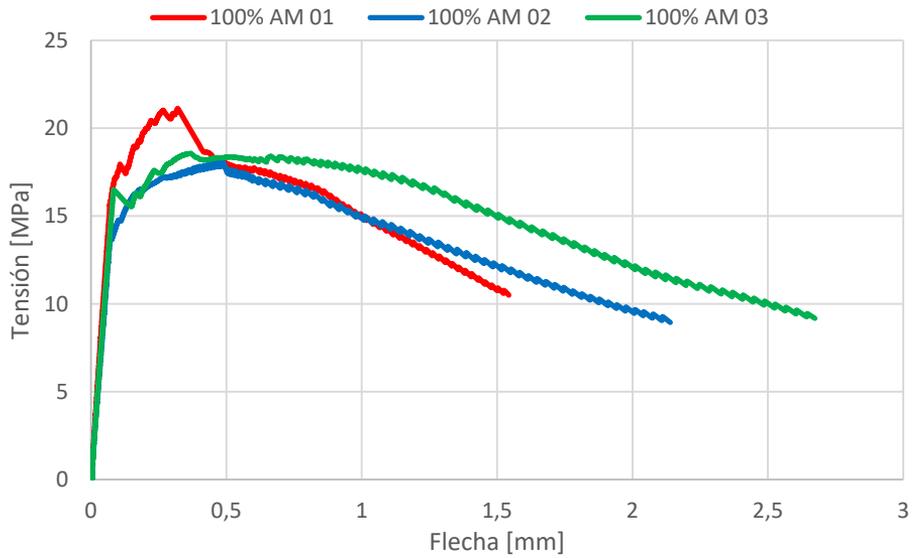


Figura 175. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% AM (B).

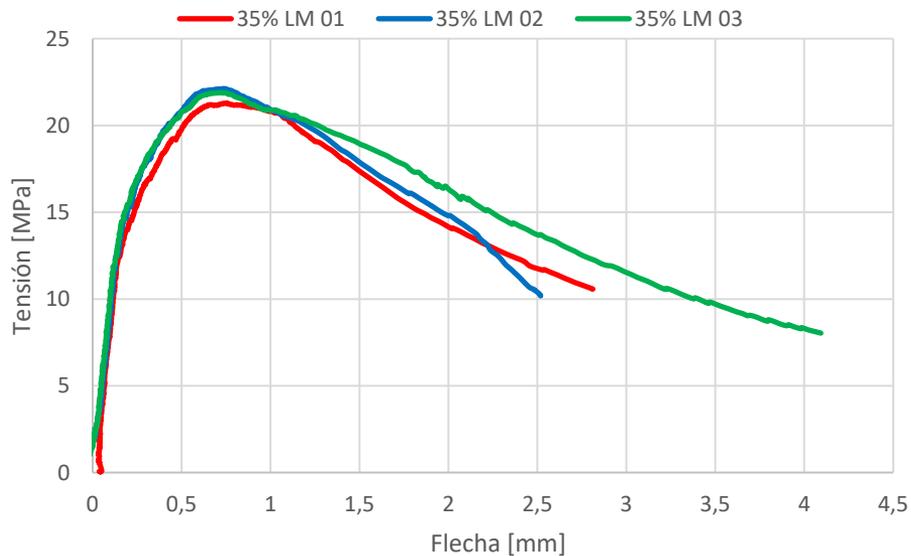


Figura 176. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% LM.

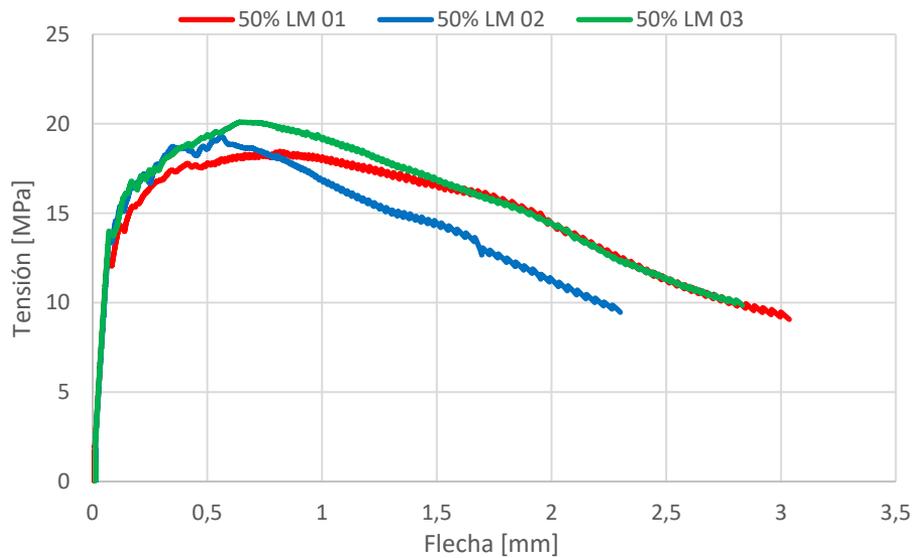


Figura 177. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% LM.

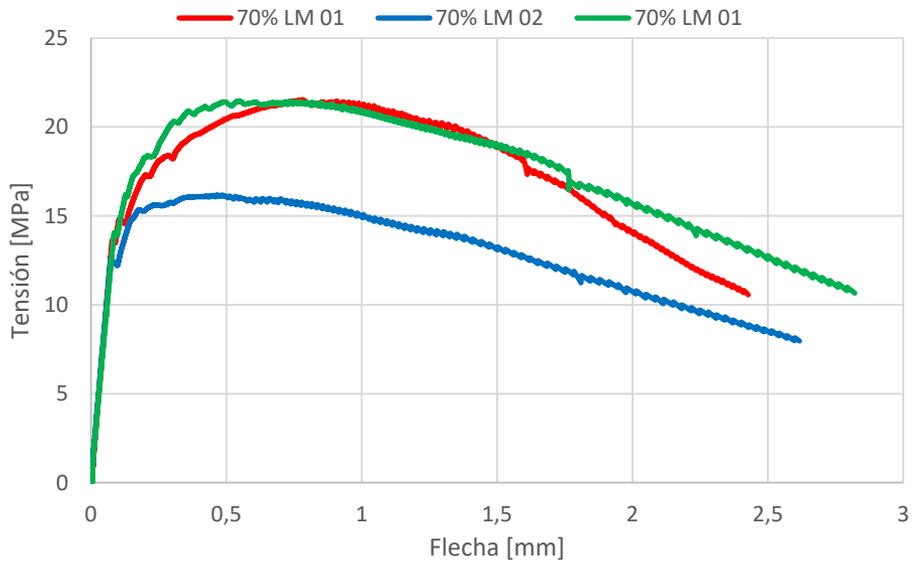


Figura 178. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% LM.

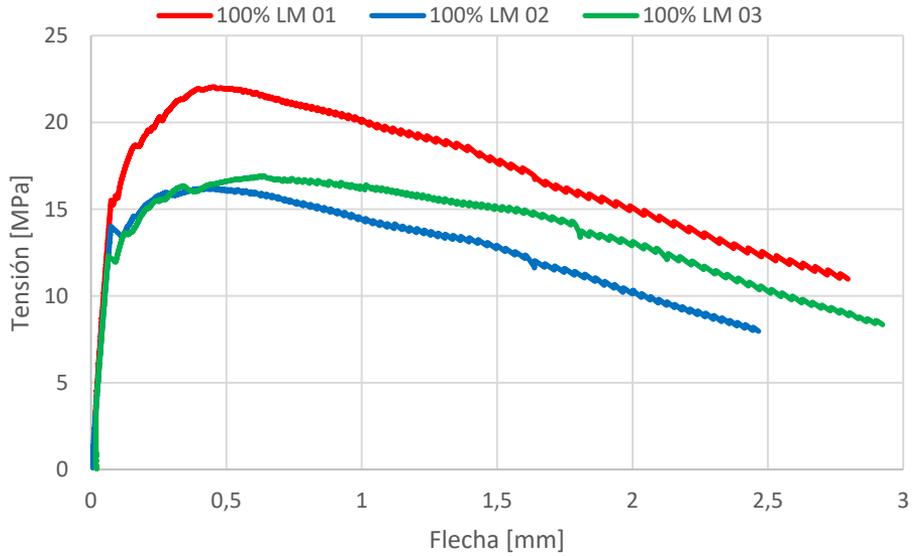


Figura 179. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% LM.

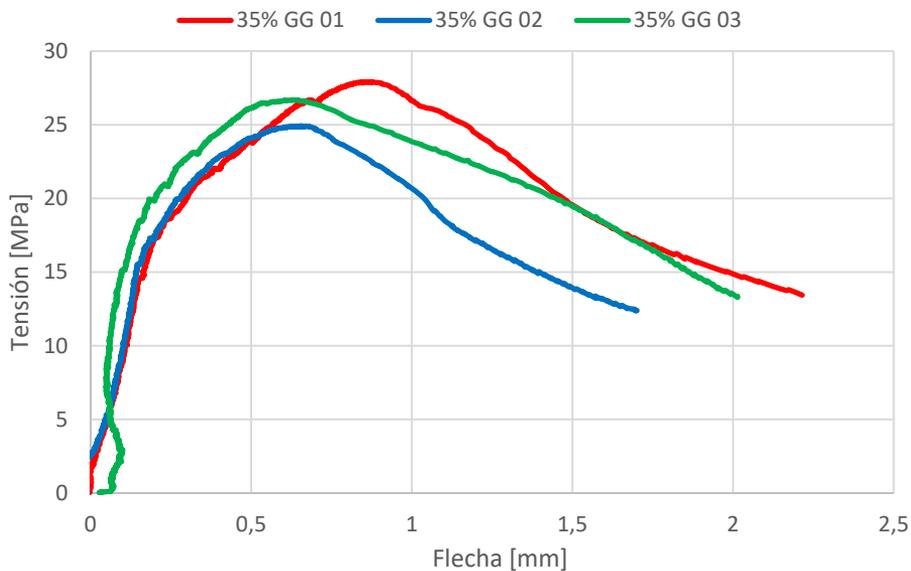


Figura 180. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% GG.

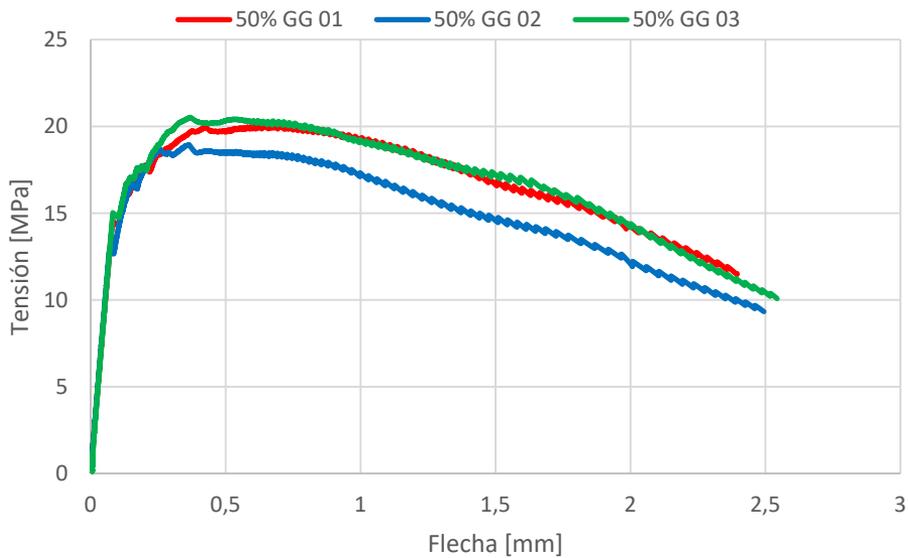


Figura 181. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% GG.

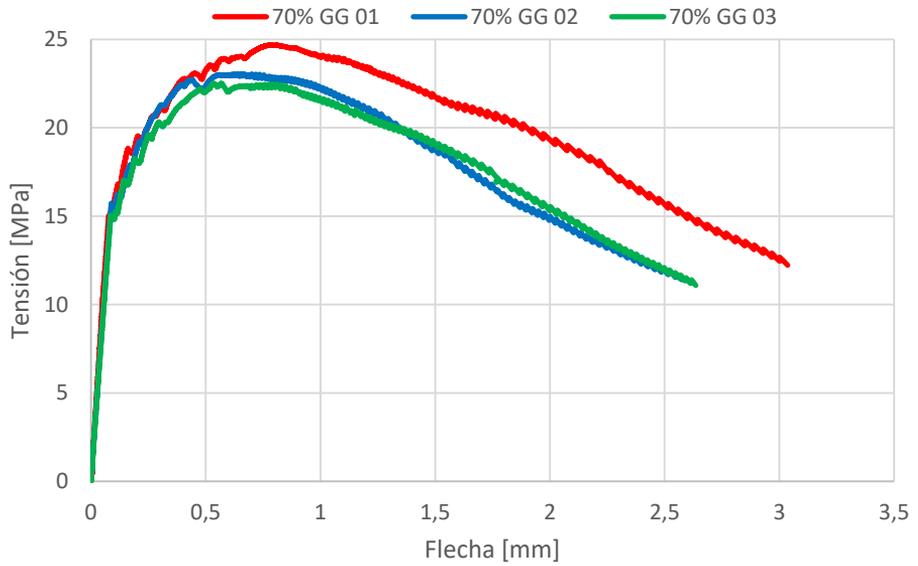


Figura 182. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% GG.

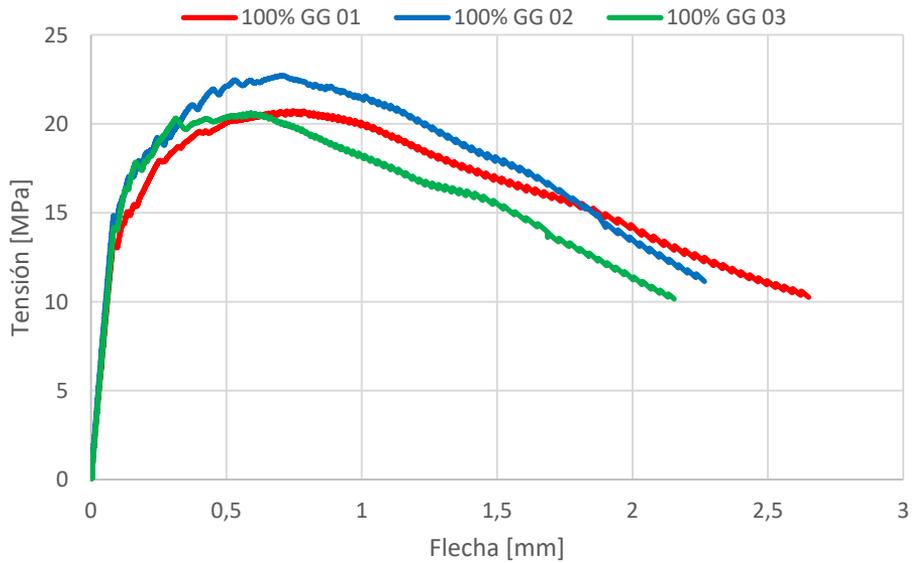


Figura 183. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% GG.

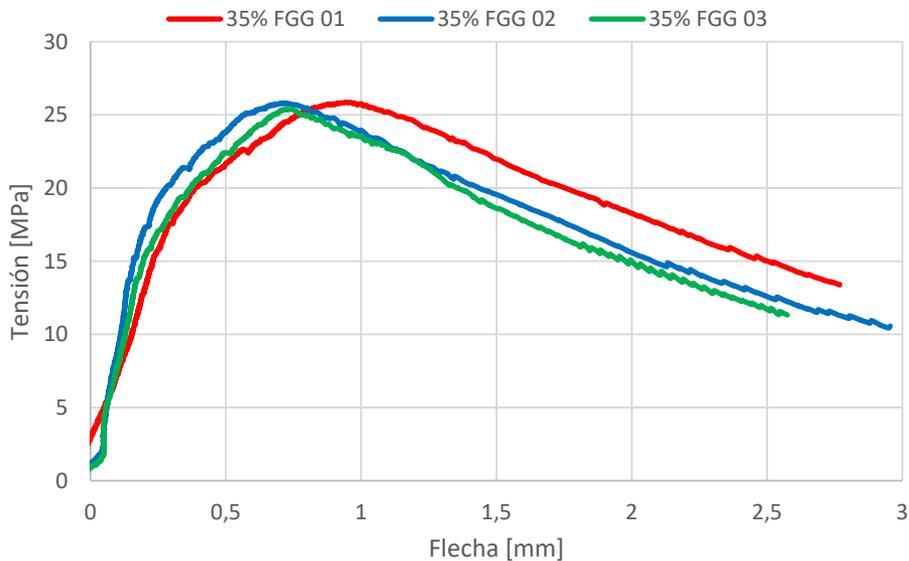


Figura 184. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% FGG.

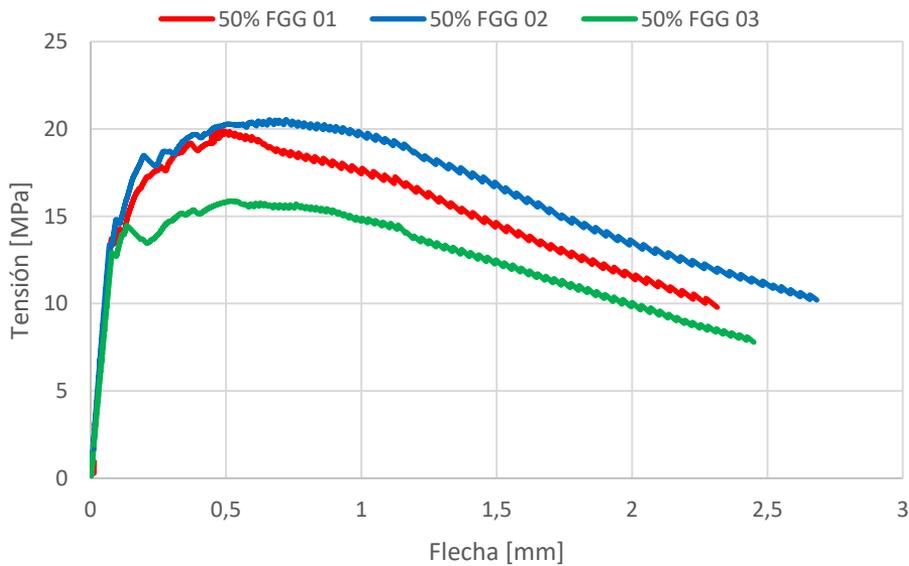


Figura 185. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% FGG.

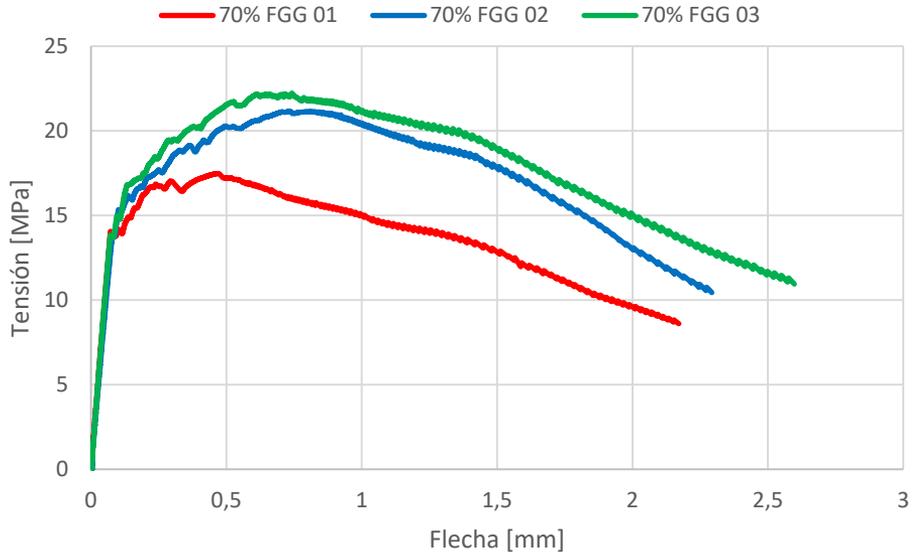


Figura 186. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FGG (A).

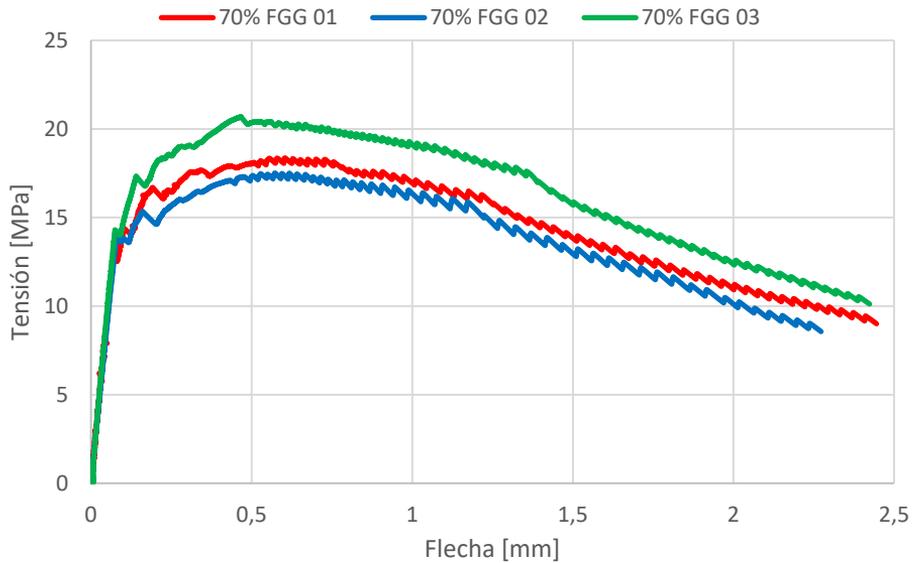


Figura 187. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FGG (B).

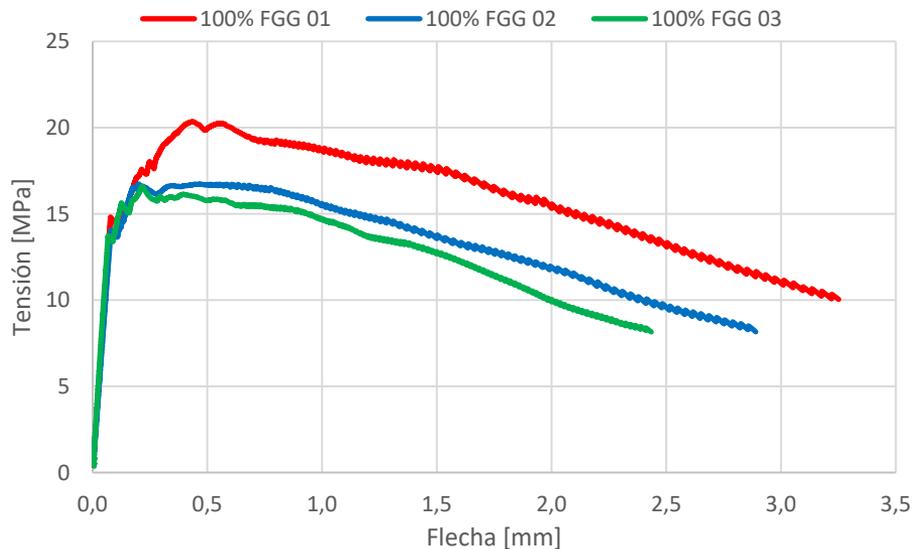


Figura 188. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FGG (A).

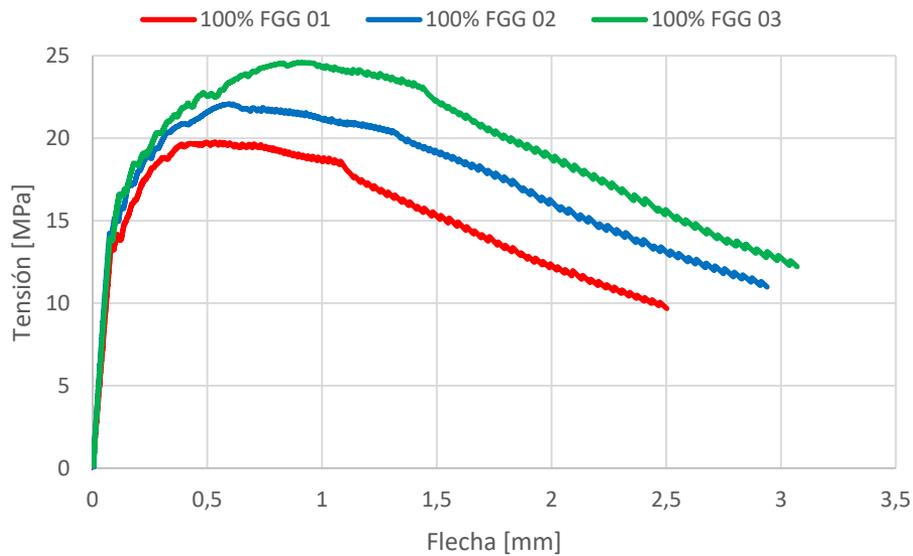


Figura 189. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FGG (B).

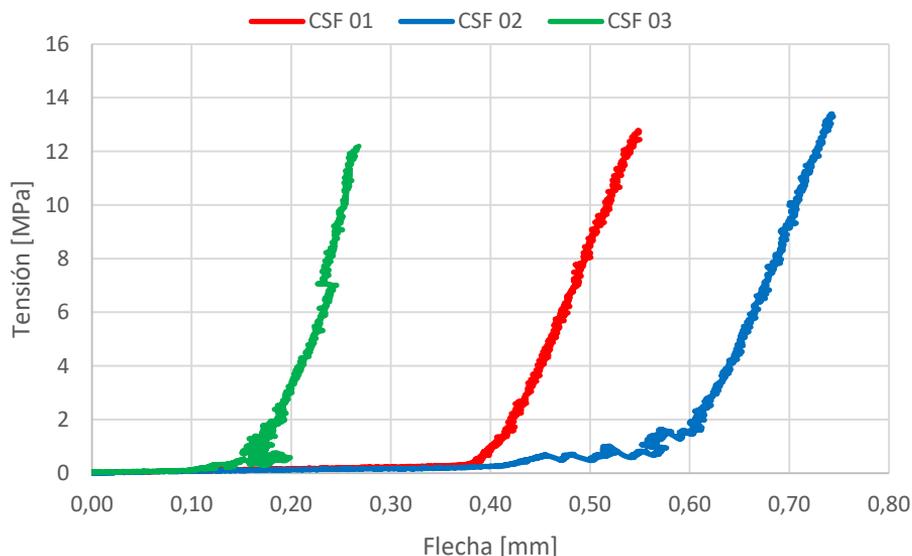


Figura 190. Curvas tensión-flecha del HMARF sin fibra de acero.

VALORES OBTENIDOS DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL HMARF.

A continuación, se muestran los resultados de resistencia a flexión de todas las amasadas realizadas con HMARF. Los resultados se obtuvieron de los ensayos de flexotracción realizados sobre probetas prismáticas de 10×10×40 cm con una luz entre apoyos de 30 cm. También se indican la carga máxima registrada y la distancia entre la parte superior de la fisura y el centro del vano de la probeta (d).

Probeta	Carga máx. [kN]	R. Flexión [MPa]	d [mm]	Fecha del ensayo
Control 01	75,94	22,78	15	06/06/2017
Control 02	74,08	22,22	37	06/06/2017
Control 03	55,66	16,70	4	06/06/2017
Control-A 01	81,19	24,36	53	06/10/2017
Control-A 02	59,18	17,75	15	06/10/2017
Control-A 03	47,04	14,11	45	06/10/2017
Control-B 01	54,32	16,30	37	06/10/2017
Control-B 02	75,61	22,68	53	06/10/2017
Control-B 03	81,44	24,43	33	06/10/2017

Tabla 67. Resistencia a flexión del HMARF de control.



Probeta	Carga máx. [kN]	R. Flexión [MPa]	d [mm]	Fecha del ensayo
100% FG 01	66,17	19,85	2	08/06/2017
100% FG 02	74,73	22,42	28	08/06/2017
100% FG 03	75,15	22,55	39	08/06/2017
70% FG 01	68,80	20,64	27	08/06/2017
70% FG 02	83,76	25,13	0	08/06/2017
70% FG 03	78,30	23,49	11	08/06/2017
50% FG 01	56,20	16,86	47	21/06/2017
50% FG 02	60,17	18,05	36	21/06/2017
50% FG 03	63,15	18,95	45	21/06/2017
35% FG 01	88,22	26,47	22	06/06/2018
35% FG 02	82,30	24,69	7	06/06/2018
35% FG 03	73,19	21,96	23	06/06/2018

Tabla 68. Resistencia a flexión del HMARF con FG.

Probeta	Carga máx. [kN]	R. Flexión [MPa]	d [mm]	Fecha del ensayo
100% FM 01	60,19	18,06	9	15/06/2017
100% FM 02	69,66	20,90	21	15/06/2017
100% FM 03	62,18	18,65	21	15/06/2017
70% FM 01	62,04	18,61	35	15/06/2017
70% FM 02	62,25	18,68	40	15/06/2017
70% FM 03	62,50	18,75	3	15/06/2017
70% FM-B 01	65,03	19,51	8	14/02/2018
70% FM-B 02	62,62	18,79	10	14/02/2018
70% FM-B 03	67,54	20,26	17	14/02/2018
50% FM 01	67,13	20,14	37	19/06/2017
50% FM 02	73,54	22,06	16	19/06/2017
50% FM 03	74,21	22,26	28	19/06/2017
35% FM 01	73,79	22,14	32	31/05/2018
35% FM 02	62,73	18,82	18	31/05/2018
35% FM 03	40,18	12,05	38	31/05/2018

Tabla 69. Resistencia a flexión del HMARF con FM.



Probeta	Carga máx. [kN]	R. Flexión [MPa]	d [mm]	Fecha del ensayo
100% LM 01	73,49	22,05	16	19/06/2017
100% LM 02	54,08	16,22	8	19/06/2017
100% LM 03	56,40	16,92	27	19/06/2017
70% LM 01	71,79	21,54	46	19/06/2017
70% LM 02	53,94	16,18	0	19/06/2017
70% LM 03	71,54	21,46	26	19/06/2017
50% LM 01	61,54	18,46	12	21/06/2017
50% LM 02	64,24	19,27	36	21/06/2017
50% LM 03	66,99	20,10	6	21/06/2017
35% LM 01	71,00	21,30	30	06/06/2018
35% LM 02	73,75	22,13	33	06/06/2018
35% LM 03	72,95	21,88	22	06/06/2018

Tabla 70. Resistencia a flexión del HMARF con LM.

Probeta	Carga máx. [kN]	R. Flexión [MPa]	d [mm]	Fecha del ensayo
100% AM 01	60,34	18,10	26	21/06/2017
100% AM 02	56,84	17,05	28	21/06/2017
100% AM 03	67,13	20,14	32	21/06/2017
100% AM-B 01	70,42	21,13	44	20/02/2018
100% AM-B 02	60,32	18,10	22	20/02/2018
100% AM-B 03	61,89	18,57	2	20/02/2018
70% AM 01	79,89	23,97	21	23/06/2017
70% AM 02	77,60	23,28	45	23/06/2017
70% AM 03	66,18	19,85	21	23/06/2017
70% AM-B 01	80,65	24,20	28	20/02/2018
70% AM-B 02	71,38	21,41	46	20/02/2018
70% AM-B 03	67,37	20,21	4	20/02/2018
50% AM 01	70,69	21,21	7	15/06/2017
50% AM 02	78,65	23,60	32	15/06/2017
50% AM 03	65,10	19,53	26	15/06/2017
35% AM 01	45,29	13,59	3	31/05/2018
35% AM 02	45,64	13,69	11	31/05/2018
35% AM 03	53,51	16,05	44	31/05/2018

Tabla 71. Resistencia a flexión del HMARF con AM.



Probeta	Carga máx. [kN]	R. Flexión [MPa]	d [mm]	Fecha del ensayo
100% GG 01	69,14	20,74	24	23/06/2017
100% GG 02	75,72	22,72	31	23/06/2017
100% GG 03	68,71	20,61	35	23/06/2017
70% GG 01	82,31	24,69	9	27/06/2017
70% GG 02	76,85	23,06	41	27/06/2017
70% GG 03	75,05	22,52	39	27/06/2017
50% GG 01	66,85	20,06	0	23/06/2017
50% GG 02	63,09	18,93	16	23/06/2017
50% GG 03	68,40	20,52	12	23/06/2017
35% GG. 01	88,85	26,66	27	12/06/2018
35% GG. 02	83,08	24,92	27	12/06/2018
35% GG. 03	84,31	25,29	29	12/06/2018

Tabla 72. Resistencia a flexión del HMARF con GG.

Probeta	Carga máx. [kN]	R. Flexión [MPa]	d [mm]	Fecha del ensayo
100% FGG-A 01	67,83	20,35	11	14/02/2018
100% FGG-A 02	55,78	16,73	16	14/02/2018
100% FGG-A 03	55,31	16,59	2	16/02/2018
100% FGG-B 01	65,93	19,78	25	22/02/2018
100% FGG-B 02	73,62	22,09	11	22/02/2018
100% FGG-B 03	81,95	24,59	9	22/02/2018
70% FGG-A 01	58,24	17,47	33	14/02/2018
70% FGG-A 02	70,53	21,16	53	14/02/2018
70% FGG-A 03	74,09	22,23	43	16/02/2018
70% FGG-B 01	61,20	18,36	22	22/02/2018
70% FGG-B 02	58,36	17,51	26	22/02/2018
70% FGG-B 03	68,94	20,68	27	22/02/2018
50% FGG 01	66,56	19,97	29	20/02/2018
50% FGG 02	68,45	20,54	2	20/02/2018
50% FGG 03	52,92	15,88	38	20/02/2018
35% FGG 01	86,20	25,86	43	28/06/2018
35% FGG 02	86,04	25,81	10	28/06/2018
35% FGG 03	84,61	25,38	22	28/06/2018

Tabla 73. Resistencia a flexión del HMARF con FGG.



VALORES OBTENIDOS DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL HMARF.

En las tablas que se observan en este apartado se resumen los resultados obtenidos para determinar el comportamiento a tracción de todas las amasadas realizadas con HMARF. Se indican la resistencia a la fisuración, la deformación elástica, la deformación pico, la abertura de fisuración inicial y la abertura máxima. Como abertura máxima se ha considerado la mitad de la longitud de las fibras.

Probeta	R. Fisuración [MPa]	Deformación pico (‰)	Deformación (‰)	R. Tracción [MPa]	W ₀ [mm]	W _{max} [mm]
Control 01	12,00	2,40	0,43	8,53	2,675	6,500
Control 02	9,05	7,03	0,19	8,09	4,662	6,500
Control 03	8,36	5,17	0,18	5,20	5,894	6,500
Control-A 01	8,96	9,36	0,19	9,32	4,633	6,500
Control-A 02	7,47	1,78	0,19	7,71	3,197	6,500
Control-A 03	8,13	0,94	0,20	4,75	2,522	6,500
Control-B 01	8,29	3,32	0,18	5,46	6,043	6,500
Control-B 02	9,24	6,65	0,19	8,37	4,329	6,500
Control-B 03	8,68	6,70	0,19	9,80	3,847	6,500

Tabla 74. Resistencia a tracción del HMARF de control.

Probeta	R. Fisuración [MPa]	Deformación pico (‰)	Deformación (‰)	R. Tracción [MPa]	W ₀ [mm]	W _{max} [mm]
100% FG 01	12,41	1,23	0,52	9,01	2,106	6,500
100% FG 02	8,43	5,45	0,20	7,35	4,081	6,500
100% FG 03	8,89	4,14	0,18	9,01	4,610	6,500
70% FG 01	7,45	5,08	0,12	8,08	4,282	6,500
70% FG 02	9,07	7,14	0,20	10,14	2,350	6,500
70% FG 03	9,38	6,02	0,23	9,18	4,479	6,500
50% FG 01	8,35	1,39	0,21	6,59	2,164	6,500
50% FG 02	8,21	1,82	0,18	7,20	3,162	6,500
50% FG 03	9,36	2,75	0,21	6,58	4,310	6,500
35% FG 01	11,26	2,90	0,48	12,10	1,141	6,500
35% FG 02	10,61	3,35	0,35	10,53	2,420	6,500
35% FG 03	8,66	3,46	0,35	9,87	2,324	6,500

Tabla 75. Resistencia a tracción del HMARF con FG.



Probeta	R. Fisuración [MPa]	Deformación pico (‰)	Deformación (‰)	R. Tracción [MPa]	W ₀ [mm]	W _{max} [mm]
100% FM 01	7,84	1,88	0,18	7,52	3,707	6,500
100% FM 02	8,87	4,15	0,21	8,14	3,457	6,500
100% FM 03	8,55	2,58	0,16	6,93	3,669	6,500
70% FM 01	8,77	3,15	0,21	6,73	3,758	6,500
70% FM 02	8,68	3,69	0,19	6,67	4,543	6,500
70% FM 03	8,31	3,93	0,19	6,83	3,679	6,500
70% FM-B 01	8,94	3,85	0,21	7,13	2,656	6,500
70% FM-B 02	8,07	3,27	0,20	7,39	-	6,500
70% FM-B 03	8,47	4,60	0,21	7,85	4,360	6,500
50% FM 01	9,48	3,51	0,22	7,31	4,449	6,500
50% FM 02	10,11	3,40	0,23	8,41	4,168	6,500
50% FM 03	8,79	4,24	0,17	8,79	3,875	6,500
35% FM 01	10,21	1,81	0,52	10,41	1,323	6,500
35% FM 02	9,51	1,48	0,59	8,46	1,236	6,500
35% FM 03	7,46	-1,41	0,37	-	-	6,500

Tabla 76. Resistencia a tracción del HMARF con FM.

Probeta	R. Fisuración [MPa]	Deformación pico (‰)	Deformación (‰)	R. Tracción [MPa]	W ₀ [mm]	W _{max} [mm]
100% LM 01	9,18	2,94	0,18	8,91	3,693	6,500
100% LM 02	8,23	1,57	0,18	5,95	3,404	6,500
100% LM 03	7,11	4,48	0,15	6,16	5,270	6,500
70% LM 01	8,69	6,13	0,21	8,16	4,082	6,500
70% LM 02	7,17	2,10	0,17	6,36	3,476	6,500
70% LM 03	9,49	2,90	0,24	8,52	4,083	6,500
50% LM 01	7,04	6,03	0,15	6,85	4,704	6,500
50% LM 02	8,67	2,97	0,18	7,35	3,376	6,500
50% LM 03	8,16	5,69	0,17	7,40	4,053	6,500
35% LM 01	9,69	2,42	0,53	9,65	2,107	6,500
35% LM 02	9,08	3,30	0,40	9,90	2,565	6,500
35% LM 03	8,97	4,74	0,35	9,11	3,494	6,500

Tabla 77. Resistencia a tracción del HMARF con LM.



Probeta	R. Fisuración [MPa]	Deformación pico (‰)	Deformación (‰)	R. Tracción [MPa]	W ₀ [mm]	W _{max} [mm]
100% AM 01	10,26	4,00	0,56	12,91	0,419	6,500
100% AM 02	8,87	3,14	0,20	5,69	4,293	6,500
100% AM 03	8,82	1,74	0,19	8,49	2,678	6,500
100% AM-B 01	10,74	1,36	0,20	7,99	1,630	6,500
100% AM-B 02	8,84	3,30	0,19	6,16	2,831	6,500
100% AM-B 03	9,92	2,55	0,20	6,03	4,629	6,500
70% AM 01	9,45	5,64	0,19	9,25	3,690	6,500
70% AM 02	9,41	4,42	0,20	9,20	3,919	6,500
70% AM 03	8,78	2,72	0,20	7,96	3,987	6,500
70% AM-B 01	11,24	3,54	0,33	9,53	2,942	6,500
70% AM-B 02	9,76	3,02	0,19	8,05	3,501	6,500
70% AM-B 03	9,97	2,00	0,22	7,56	2,843	6,500
50% AM 01	8,28	2,45	0,18	9,33	3,610	6,500
50% AM 02	8,70	2,33	0,19	11,08	3,605	6,500
50% AM 03	8,70	2,40	0,19	7,95	4,128	6,500
35% AM 01	7,01	0,83	0,21	5,53	0,845	6,500
35% AM 02	8,19	-0,93	0,33	-	-	6,500
35% AM 03	7,59	1,45	0,20	6,54	1,404	6,500

Tabla 78. Resistencia a tracción del HMARF con AM.

Probeta	R. Fisuración [MPa]	Deformación pico (‰)	Deformación (‰)	R. Tracción [MPa]	W ₀ [mm]	W _{max} [mm]
100% GG 01	8,47	4,88	0,21	8,10	3,631	6,500
100% GG 02	9,44	4,67	0,22	8,94	3,939	6,500
100% GG 03	8,47	4,88	0,21	8,00	3,736	6,500
70% GG 01	9,62	6,44	0,20	9,52	1,858	6,500
70% GG 02	9,43	3,07	0,22	9,63	1,278	6,500
70% GG 03	8,80	3,90	0,21	9,29	2,542	6,500
50% GG 01	8,48	2,23	0,19	8,46	4,418	6,500
50% GG 02	7,86	2,39	0,17	7,67	3,534	6,500
50% GG 03	8,88	2,22	0,20	8,52	3,966	6,500
35% GG 01	11,12	4,87	0,50	11,31	3,730	6,500
35% GG 02	11,14	2,38	0,44	11,16	3,488	6,500
35% GG 03	10,79	3,60	0,28	10,23	3,861	6,500

Tabla 79. Resistencia a tracción del HMARF con GG.



Probeta	R. Fisuración [MPa]	Deformación pico (‰)	Deformación (‰)	R. Tracción [MPa]	W ₀ [mm]	W _{max} [mm]
100% FGG-A 01	8,54	3,25	0,19	8,20	4,664	6,500
100% FGG-A 02	8,11	0,36	0,19	8,37	1,500	6,500
100% FGG-A 03	7,94	1,06	0,16	6,76	2,732	6,500
100% FGG-B 01	8,17	2,65	0,20	8,26	3,017	6,500
100% FGG-B 02	8,81	4,61	0,19	8,66	4,122	6,500
100% FGG-B 03	9,78	7,02	0,22	9,37	4,203	6,500
70% FGG-A 01	8,25	3,46	0,17	5,97	3,571	6,500
70% FGG-A 02	9,10	6,18	0,21	7,69	4,140	6,500
70% FGG-A 03	8,78	5,08	0,18	8,70	4,083	6,500
70% FGG-B 01	8,60	4,40	0,19	6,33	3,523	6,500
70% FGG-B 02	8,37	4,03	0,20	6,13	3,738	6,500
70% FGG-B 03	8,76	3,65	0,19	7,99	3,410	6,500
50% FGG 01	8,28	4,41	0,19	7,63	3,034	6,500
50% FGG 02	8,71	4,44	0,19	7,71	3,755	6,500
50% FGG 03	8,30	4,09	0,21	5,05	4,440	6,500
35% FGG 01	11,91	2,90	0,75	11,91	1,976	6,500
35% FGG 02	11,85	2,36	0,53	11,66	1,660	6,500
35% FGG 03	10,61	3,27	0,54	11,80	1,662	6,500

Tabla 80. Resistencia a tracción del HMARF con FGG.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN DEL HMARF.

La retracción se ha determinado midiendo la variación de longitud sobre probetas prismáticas de dimensiones 285×25×25 mm, una vez finalizado el periodo de curado. En las siguientes tablas se observan los resultados obtenidos.



Días	Variación de longitud (%)			
	Control A	Control B	Control	Media
0	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
1	0,002%	0,002%	0,000%	0,001%
3	0,003%	0,002%	0,001%	0,002%
7	0,005%	0,006%	0,005%	0,005%
14	0,008%	0,009%	0,012%	0,010%
28	0,014%	0,014%	0,012%	0,013%
60	0,023%	0,023%	0,018%	0,021%
90	0,025%	0,026%	0,016%	0,022%
140	0,028%	0,029%	0,017%	0,025%
180	0,031%	0,032%	0,023%	0,028%

Tabla 81. Resultados de la retracción del HMARF de control.

Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	100% FG 01	100% FG 02			50% FG 01	50% FG 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	13,00	4,00	0,003%	1	0,00	2,00	0,000%
3	21,00	13,00	0,006%	3	11,00	15,00	0,005%
7	20,00	27,00	0,008%	7	18,00	20,00	0,007%
14	39,00	31,00	0,012%	14	22,00	29,00	0,009%
28	46,00	38,00	0,015%	28	18,00	23,00	0,007%
60	63,00	53,00	0,020%	60	46,00	46,00	0,016%
90	64,00	52,00	0,020%	90	46,00	47,00	0,016%
180	81,00	69,00	0,026%	180	69,00	70,00	0,024%
Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	70% FG 01	70% FG 02			35% FG 01	35% FG 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	2,00	4,00	0,001%	1	9,00	8,00	0,003%
3	12,00	12,00	0,004%	3	10,00	11,00	0,004%
7	15,00	15,00	0,005%	7	22,00	23,00	0,008%
14	35,00	31,00	0,012%	15	22,00	23,00	0,008%
28	39,00	36,00	0,013%	28	24,00	25,00	0,009%
60	56,00	55,00	0,019%	60	33,00	31,00	0,011%
90	54,00	53,00	0,019%	90	40,00	42,00	0,014%
180	71,00	68,00	0,024%	180	60,00	63,00	0,022%

Tabla 82. Resultados de la retracción del HMARF con FG.



Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	100% GG 01	100% GG 02	
0	0,00	0,00	0,000%
3	4,00	5,00	0,002%
7	18,00	18,00	0,006%
14	16,00	15,00	0,005%
28	18,00	18,00	0,006%
60	45,00	45,00	0,016%
90	49,00	47,00	0,017%
180	71,00	72,00	0,025%

Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	70% GG 01	70% GG 02	
0	0,00	0,00	0,000%
1	10,00	13,00	0,004%
3	20,00	18,00	0,007%
7	28,00	29,00	0,010%
14	24,00	26,00	0,009%
28	35,00	40,00	0,013%
60	53,00	59,00	0,020%
90	53,00	59,00	0,020%
180	75,00	82,00	0,028%

Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	50% GG 01	50% GG 02	
0	0,00	0,00	0,000%
3	4,00	4,00	0,001%
7	17,00	18,00	0,006%
14	13,00	17,00	0,005%
28	13,00	18,00	0,005%
60	40,00	45,00	0,015%
90	43,00	49,00	0,016%
180	67,00	69,00	0,024%

Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	35% GG 01	35% GG 02	
0	0,00	0,00	0,000%
1	19,00	14,00	0,006%
3	24,00	17,00	0,007%
7	28,00	18,00	0,008%
15	32,00	25,00	0,010%
28	40,00	34,00	0,013%
60	49,00	41,00	0,016%
90	57,00	46,00	0,018%
180	73,00	62,00	0,024%

Tabla 83. Resultados de la retracción del HMARF con GG.



Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	100% FM 01	100% FM 02			50% FM 01	50% FM 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	15,00	7,00	0,004%	1	14,00	10,00	0,004%
3	20,00	9,00	0,005%	3	21,00	18,00	0,007%
7	35,00	20,00	0,010%	7	24,00	21,00	0,008%
14	50,00	30,00	0,014%	14	35,00	32,00	0,012%
28	49,00	24,00	0,013%	28	32,00	26,00	0,010%
60	77,00	43,00	0,021%	60	54,00	51,00	0,018%
90	81,00	47,00	0,022%	90	53,00	51,00	0,018%
180	98,00	63,00	0,028%	180	76,00	70,00	0,026%
Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	70% FM 01	70% FM 02			35% FM 01	35% FM 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	12,00	8,00	0,004%	1	4,00	4,00	0,001%
3	11,00	10,00	0,004%	3	15,00	13,00	0,005%
7	19,00	20,00	0,007%	7	24,00	21,00	0,008%
14	34,00	32,00	0,012%	15	25,00	24,00	0,009%
28	25,00	26,00	0,009%	28	25,00	24,00	0,009%
60	49,00	48,00	0,017%	60	33,00	31,00	0,011%
90	52,00	51,00	0,018%	90	39,00	38,00	0,014%
180	69,00	69,00	0,024%	180	59,00	58,00	0,021%

Tabla 84. Resultados de la retracción del HMARF con FM.



Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	100% LM 01	100% LM 02			50% LM 01	50% LM 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	13,00	10,00	0,004%	1	6,00	2,00	0,001%
3	18,00	21,00	0,007%	3	10,00	17,00	0,005%
7	22,00	24,00	0,008%	7	16,00	26,00	0,007%
14	34,00	38,00	0,013%	14	21,00	34,00	0,010%
28	36,00	40,00	0,013%	28	19,00	35,00	0,009%
60	58,00	62,00	0,021%	60	45,00	66,00	0,019%
90	59,00	66,00	0,022%	90	43,00	68,00	0,019%
180	85,00	85,00	0,030%	180	67,00	98,00	0,029%
Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	70% LM 01	70% LM 02			35% LM 01	35% LM 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	11,00	12,00	0,004%	1	23,00	9,00	0,006%
3	17,00	19,00	0,006%	3	27,00	10,00	0,006%
7	20,00	22,00	0,007%	7	38,00	21,00	0,010%
14	30,00	32,00	0,011%	15	39,00	22,00	0,011%
28	27,00	29,00	0,010%	28	39,00	23,00	0,011%
60	46,00	50,00	0,017%	60	45,00	29,00	0,013%
90	48,00	48,00	0,017%	90	57,00	38,00	0,017%
180	68,00	72,00	0,025%	180	79,00	61,00	0,025%

Tabla 85. Resultados de la retracción del HMARF con LM.



Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	100% AM 01	100% AM 02			50% AM 01	50% AM 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	14,00	14,00	0,005%	1	10,00	11,00	0,004%
3	14,00	14,00	0,005%	3	22,00	58,00	0,014%
7	18,00	17,00	0,006%	7	20,00	63,00	0,015%
14	27,00	27,00	0,009%	14	30,00	75,00	0,018%
28	24,00	21,00	0,008%	28	31,00	74,00	0,018%
60	47,00	49,00	0,017%	60	52,00	92,00	0,025%
90	49,00	49,00	0,017%	90	55,00	95,00	0,026%
180	70,00	72,00	0,025%	180	72,00	114,00	0,033%
Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	70% AM 01	70% AM 02			35% AM 01	35% AM 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	-	-	-	1	5,00	4,00	0,002%
3	2,00	7,00	0,002%	3	15,00	15,00	0,005%
7	14,00	22,00	0,006%	7	20,00	22,00	0,007%
14	12,00	19,00	0,005%	15	23,00	29,00	0,009%
28	15,00	22,00	0,006%	28	24,00	28,00	0,009%
60	41,00	49,00	0,016%	60	31,00	34,00	0,011%
90	45,00	53,00	0,017%	90	37,00	39,00	0,013%
180	67,00	75,00	0,025%	180	55,00	59,00	0,020%

Tabla 86. Resultados de la retracción del HMARF con AM.



Anejo 1. Resultados de los ensayos

Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	100% FGG 01	100% FGG 02			50% FGG 01	50% FGG 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	13,00	14,00	0,005%	1	6,00	8,00	0,002%
3	24,00	26,00	0,009%	3	18,00	21,00	0,007%
7	42,00	43,00	0,015%	7	30,00	32,00	0,011%
14	59,00	62,00	0,021%	14	40,00	44,00	0,015%
28	78,00	82,00	0,028%	28	59,00	62,00	0,021%
60	81,00	83,00	0,029%	60	68,00	67,00	0,024%
90	88,00	90,00	0,031%	90	71,00	75,00	0,026%
180	70,00	69,00	0,024%	180	57,00	60,00	0,021%
Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %	Días	Variación de longitud (μm)		Valor medio %
	70% FGG 01	70% FGG 02			35% FGG 01	35% FGG 02	
0	0,00	0,00	0,000%	0	0,00	0,00	0,000%
1	14,00	10,00	0,004%	1	4,00	5,00	0,002%
3	23,00	19,00	0,007%	3	-	-	-
7	42,00	30,00	0,013%	7	15,00	15,00	0,005%
14	69,00	45,00	0,020%	15	25,00	23,00	0,008%
28	107,00	58,00	0,029%	28	31,00	30,00	0,011%
60	128,00	60,00	0,033%	60	39,00	39,00	0,014%
90	137,00	62,00	0,035%	90	50,00	51,00	0,018%
180	120,00	48,00	0,029%	180	72,00	71,00	0,025%

Tabla 87. Resultados de la retracción del HMARF con FGG.



RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA DEL HMARF.

En las tablas que se exponen a continuación se muestran los datos que se han utilizado para poder determinar la absorción de agua a las 24 horas del HMARF.

Amasada	Control		
	CONTROL 01	CONTROL 02	CONTROL 03
Masa probeta seca (g)	226,20	228,40	233,60
Masa probeta en agua (g)	133,00	134,60	135,20
Masa probeta saturada (g)	227,00	229,00	234,40
T ^a (°C)	20	20	20
Densidad agua (kg/m ³)	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m ³)	2402	2415	2351
WA24 (%)	0,35%	0,26%	0,34%
WA24 media (%)	0,32%		

Tabla 88. Resultados de absorción de agua del HMARF de control.



Amasada	100%			70%		
	100% FG 01	100% FG 02	100% FG 03	70% FG 01	70% FG 02	70% FG 03
Masa probeta seca (g)	232,4	260	243	211,6	209,6	251,4
Masa probeta en agua (g)	135,8	153,6	143,2	124,4	123,2	148,2
Masa probeta saturada (g)	233	261	244	212,2	210,4	252,4
Tª (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m³)	2387	2416	2406	2406	2399	2408
WA24 (%)	0,26%	0,38%	0,41%	0,28%	0,38%	0,40%
WA24 media (%)	0,35%			0,35%		
Amasada	50%			35%		
	50% FG 01	50% FG 02	50% FG 03	35% FG 01	35% FG 02	35% FG 03
Masa probeta seca (g)	222,4	250,6	284,2	260,4	266,8	260,4
Masa probeta en agua (g)	130,6	148	168,2	150,6	154,6	150,6
Masa probeta saturada (g)	223,2	251,6	285,4	261,2	267,8	261,4
Tª (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m³)	2397	2415	2421	2350	2353	2346
WA24 (%)	0,36%	0,40%	0,42%	0,31%	0,37%	0,38%
WA24 media (%)	0,39%			0,36%		

Tabla 89. Resultados de absorción de agua del HMARF con FG.



Amasada	100%			70%		
	100% FGG 01	100% FGG 02	100% FGG 03	70% FGG 01	70% FGG 02	70% FGG 03
Masa probeta seca (g)	215	225	226,8	206,2	199,2	265,6
Masa probeta en agua (g)	128,4	135	135,4	123,2	119,4	158,4
Masa probeta saturada (g)	215,8	225,8	227,4	206,8	200	266,4
T ^a (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m ³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m ³)	2456	2474	2461	2462	2467	2455
WA24 (%)	0,37%	0,36%	0,26%	0,29%	0,40%	0,30%
WA24 media (%)	0,33%			0,33%		
Amasada	50%			35%		
	50% FGG 01	50% FGG 02	50% FGG 03	35% FGG 01	35% FGG 02	35% FGG 03
Masa probeta seca (g)	218	269,2	278,4	247,8	220,8	248,4
Masa probeta en agua (g)	129,8	159,8	166	143,2	128	144,2
Masa probeta saturada (g)	218,8	270	279,4	248,6	221,6	249,2
T ^a (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m ³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m ³)	2445	2438	2451	2347	2355	2361
WA24 (%)	0,37%	0,30%	0,36%	0,32%	0,36%	0,32%
WA24 media (%)	0,34%			0,34%		

Tabla 90. Resultados de absorción de agua del HMARF con FGG.



Amasada	100%			70%		
	100% GG 01	100% GG 02	100% GG 03	70% GG 01	70% GG 02	70% GG 03
Masa probeta seca (g)	227,8	256	273	238,4	220,4	293,2
Masa probeta en agua (g)	131,4	148,4	158	139,2	128,4	172,4
Masa probeta saturada (g)	228,6	257,6	274,6	239	221	294,4
Tª (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m³)	2339	2340	2337	2384	2376	2399
WA24 (%)	0,35%	0,63%	0,59%	0,25%	0,27%	0,41%
WA24 media (%)	0,52%			0,31%		
Amasada	50%			35%		
	50% GG 01	50% GG 02	50% GG 03	35% GG 01	35% GG 02	35% GG 03
Masa probeta seca (g)	198,8	275,8	276,6	272,4	254,4	299,2
Masa probeta en agua (g)	113,4	159,6	159,6	157,6	147,4	174
Masa probeta saturada (g)	199,6	277,4	277,6	273	255	300,2
Tª (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m³)	2302	2337	2340	2356	2360	2367
WA24 (%)	0,40%	0,58%	0,36%	0,22%	0,24%	0,33%
WA24 media (%)	0,45%			0,26%		

Tabla 91. Resultados de absorción de agua del HMARF con GG.



Amasada	100%			70%		
	100% FM 01	100% FM 02	100% FM 03	70% FM 01	70% FM 02	70% FM 03
Masa probeta seca (g)	258,4	239,8	232,4	216,8	200	284,2
Masa probeta en agua (g)	150,8	138	133,6	125,6	115	164,2
Masa probeta saturada (g)	259,4	241	233,6	217,6	200,8	285,6
T ^a (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m ³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m ³)	2375	2324	2320	2352	2327	2337
WA24 (%)	0,39%	0,50%	0,52%	0,37%	0,40%	0,49%
WA24 media (%)	0,47%			0,42%		
Amasada	50%			35%		
	50% FM 01	50% FM 02	50% FM 03	35% FM 01	35% FM 02	35% FM 03
Masa probeta seca (g)	191,4	188,2	248,6	219,4	246,2	291,8
Masa probeta en agua (g)	111,2	109,2	144	126,2	141,6	169
Masa probeta saturada (g)	192,2	189,2	249,8	220,4	247,2	292,8
T ^a (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m ³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m ³)	2359	2348	2345	2325	2327	2353
WA24 (%)	0,42%	0,53%	0,48%	0,46%	0,41%	0,34%
WA24 media (%)	0,48%			0,40%		

Tabla 92. Resultados de absorción de agua del HMARF con FM.



Amasada	100%			70%		
	100% LM 01	100% LM 02	100% LM 03	70% LM 01	70% LM 02	70% LM 03
Masa probeta seca (g)	208,4	212,8	269,2	212,8	254,2	225,4
Masa probeta en agua (g)	121,6	124	158	123,4	148,2	131,6
Masa probeta saturada (g)	208,8	213,4	270,6	213,4	256	227,2
Tª (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m³)	2386	2376	2386	2360	2354	2353
WA24 (%)	0,19%	0,28%	0,52%	0,28%	0,71%	0,80%
WA24 media (%)	0,33%			0,60%		
Amasada	50%			35%		
	50% LM 01	50% LM 02	50% LM 03	35% LM 01	35% LM 02	35% LM 03
Masa probeta seca (g)	230,2	257,8	262,6	244,2	252	240,2
Masa probeta en agua (g)	135,8	152,8	155,6	137	140,8	135,6
Masa probeta saturada (g)	230,6	259,2	264	245,2	253,2	242
Tª (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m³)	2424	2419	2418	2253	2238	2253
WA24 (%)	0,17%	0,54%	0,53%	0,41%	0,48%	0,75%
WA24 media (%)	0,42%			0,55%		

Tabla 93. Resultados de absorción de agua del HMARF con LM.



Amasada	100%			70%		
	100% AM 01	100% AM 02	100% AM 03	70% AM 01	70% AM 02	70% AM 03
Masa probeta seca (g)	236,2	221,6	233,2	229,8	211,2	226,2
Masa probeta en agua (g)	140,6	132,2	136,2	137	125,4	130,6
Masa probeta saturada (g)	236,6	222	233,8	230,2	211,6	226,8
T ^a (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m ³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m ³)	2456	2463	2385	2461	2446	2347
WA24 (%)	0,17%	0,18%	0,26%	0,17%	0,19%	0,27%
WA24 media (%)	0,20%			0,21%		
Amasada	50%			35%		
	50% AM 01	50% AM 02	50% AM 03	35% AM 01	35% AM 02	35% AM 03
Masa probeta seca (g)	218,8	276,2	190,8	233	258,8	253
Masa probeta en agua (g)	128,2	161,6	111,2	136,6	152	149,4
Masa probeta saturada (g)	219,2	277,2	191,2	233,6	259,4	254,2
T ^a (°C)	20	20	20	20	20	20
Densidad agua (kg/m ³)	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
Densidad (kg/m ³)	2400	2385	2381	2398	2405	2410
WA24 (%)	0,18%	0,36%	0,21%	0,26%	0,23%	0,47%
WA24 media (%)	0,25%			0,32%		

Tabla 94. Resultados de absorción de agua del HMARF con AM.





LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de dosificación de HMAR [31].....	23
Tabla 2. Resistencia a compresión a 28 días del HMAR con sustitución del árido natural.	39
Tabla 3. Resistencia a flexión a 28 días del HMAR con sustitución del árido natural.	39
Tabla 4. Resistencia a tracción indirecta a 28 días del HMAR con sustitución del árido natural. .	40
Tabla 5. Influencia de la fibra de acero sobre la resistencia a flexión de los HMAR.	40
Tabla 6. Influencia de la fibra de acero sobre la resistencia a compresión de los HMAR.	41
Tabla 7. Influencia de la fibra de acero sobre la resistencia a tracción de los HMAR.	41
Tabla 8. Variación de la resistencia a flexión del HMAR con EHA o CV.	53
Tabla 9. Variación de la resistencia a la flexión en el HMAR con sustitución del árido natural.	55
Tabla 10. Variación de la resistencia a la tracción.....	57
Tabla 11. Valores del módulo elástico en los HMAR reciclados.....	58
Tabla 12. Relación entre el % de SO ₃ y de yeso.	62
Tabla 13. Características del cemento.	82
Tabla 14. Propiedades de la harina de sílice.....	84
Tabla 15. Composición química (%) de los residuos de Minersa.	87
Tabla 16. Composición química (%) de los residuos de granito.....	89
Tabla 17. Propiedades físicas y químicas de Elkem Microsilica® 940 (D).	90
Tabla 18. Propiedades físicas y químicas de Basf MasterRoc MS 610.	90
Tabla 19. Resultados absorción de agua.	98
Tabla 20. Densidad de los materiales.....	101
Tabla 21. Densidad de los residuos.....	101
Tabla 22. Resultados equivalente de arena.	104
Tabla 23. Porcentajes de reemplazo del árido total.....	106
Tabla 24. Dosificación final de HMARF.	107
Tabla 25. Programa de ensayos.....	108
Tabla 26. Determinación de los parámetros constitutivos a tracción.....	126
Tabla 27. Resumen del programa de ensayos.	219
Tabla 28. Granulometría de la arena silícea 0/0,5 mm.....	220
Tabla 29. Granulometría de la arena silícea 0,5/1,6 mm.....	221



Tabla 30. Granulometría de los gruesos de granito.	221
Tabla 31. Granulometría de los finos de mina y la arena residual de mina.	224
Tabla 32. Granulometría del humo de sílice y la harina de sílice.	226
Tabla 33. Granulometría de los finos del lavadero de la mina y el cemento.	229
Tabla 34. Granulometría de los finos de granito y los finos de granito con granalla.	231
Tabla 35. Densidad aparente.	231
Tabla 36. Densidad aparente de los residuos.	232
Tabla 37. Equivalente de arena.	232
Tabla 38. Consistencia del HMARF.	233
Tabla 39. Densidad del HMARF de control.	234
Tabla 40. Densidad del HMARF con FG.	234
Tabla 41. Densidad del HMARF con FM.	235
Tabla 42. Densidad del HMARF con LM.	235
Tabla 43. Densidad del HMARF con AM.	236
Tabla 44. Densidad del HMARF con GG.	236
Tabla 45. Densidad del HMARF con FGG.	237
Tabla 46. Resistencia a compresión del HMARF de control.	238
Tabla 47. Resistencia a compresión del HMARF con FG.	238
Tabla 48. Resistencia a compresión del HMARF con FM.	239
Tabla 49. Resistencia a compresión del HMARF con LM.	239
Tabla 50. Resistencia a compresión del HMARF con AM.	240
Tabla 51. Resistencia a compresión del HMARF con GG.	240
Tabla 52. Resistencia a compresión del HMARF con FGG.	241
Tabla 53. Módulo de elasticidad del HMARF de control.	242
Tabla 54. Módulo de elasticidad del HMARF con FG.	242
Tabla 55. Módulo de elasticidad del HMARF con FM.	243
Tabla 56. Módulo de elasticidad del HMARF con LM.	243
Tabla 57. Módulo de elasticidad del HMARF con AM.	244
Tabla 58. Módulo de elasticidad del HMARF con GG.	244
Tabla 59. Módulo de elasticidad del HMARF con FGG.	245
Tabla 60. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF de control.	245



Tabla 61. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con FG.....	246
Tabla 62. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con FM.....	246
Tabla 63. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con LM.....	247
Tabla 64. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con AM.....	247
Tabla 65. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con GG.....	248
Tabla 66. Parámetros clave de las curvas tensión-flecha del HMARF con FGG.....	248
Tabla 67. Resistencia a flexión del HMARF de control.....	265
Tabla 68. Resistencia a flexión del HMARF con FG.....	266
Tabla 69. Resistencia a flexión del HMARF con FM.....	266
Tabla 70. Resistencia a flexión del HMARF con LM.....	267
Tabla 71. Resistencia a flexión del HMARF con AM.....	267
Tabla 72. Resistencia a flexión del HMARF con GG.....	268
Tabla 73. Resistencia a flexión del HMARF con FGG.....	268
Tabla 74. Resistencia a tracción del HMARF de control.....	269
Tabla 75. Resistencia a tracción del HMARF con FG.....	269
Tabla 76. Resistencia a tracción del HMARF con FM.....	270
Tabla 77. Resistencia a tracción del HMARF con LM.....	270
Tabla 78. Resistencia a tracción del HMARF con AM.....	271
Tabla 79. Resistencia a tracción del HMARF con GG.....	271
Tabla 80. Resistencia a tracción del HMARF con FGG.....	272
Tabla 81. Resultados de la retracción del HMARF de control.....	273
Tabla 82. Resultados de la retracción del HMARF con FG.....	273
Tabla 83. Resultados de la retracción del HMARF con GG.....	274
Tabla 84. Resultados de la retracción del HMARF con FM.....	275
Tabla 85. Resultados de la retracción del HMARF con LM.....	276
Tabla 86. Resultados de la retracción del HMARF con AM.....	277
Tabla 87. Resultados de la retracción del HMARF con FGG.....	278
Tabla 88. Resultados de absorción de agua del HMARF de control.....	279
Tabla 89. Resultados de absorción de agua del HMARF con FG.....	280
Tabla 90. Resultados de absorción de agua del HMARF con FGG.....	281
Tabla 91. Resultados de absorción de agua del HMARF con GG.....	282



Lista de tablas

Tabla 92. Resultados de absorción de agua del HMARF con FM. 283

Tabla 93. Resultados de absorción de agua del HMARF con LM. 284

Tabla 94. Resultados de absorción de agua del HMARF con AM. 285



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generación de residuos por actividades económicas y hogares, EU-28, 2014 [3].	14
Figura 2. Residuos generados por sectores industriales. Año 2014.	15
Figura 3. The Sherbrooke Pedestrian Bridge (Canadá) [11].	20
Figura 4. The Seonyu Pedestrian Bridge (Corea del Sur) [11].	21
Figura 5. Retracción del HMAR con CCA bajo diferentes tratamientos [59].	32
Figura 6. Efecto de la sustitución de harina de sílice por VP sobre la resistencia a compresión del HMAR [69].	34
Figura 7. Resistencia a compresión (superior) y flexión (inferior) de HMAR con diferentes % de relaves de mineral de hierro [38].	36
Figura 8. Tipos de fibras de acero [86].	41
Figura 9. Efecto de la forma y el porcentaje de fibra de acero sobre la fluidez del HMAR [82].	42
Figura 10. Efecto de diferentes SP sobre la resistencia a compresión y a flexión del HMAR [98].	46
Figura 11. Resistencia a compresión del HMAR con diferentes porcentajes y tipos de MCS como sustitutos del cemento.	51
Figura 12. Resistencia a compresión del HMAR con diferentes porcentajes y tipos de MCS como sustitutos del humo de sílice.	51
Figura 13. Resistencia a compresión del HMAR con sustitución total del árido por diferentes materiales.	52
Figura 14. Efectos de diferentes sistemas de curado sobre la resistencia a flexión del HMAR con diferentes porcentajes de EHA [26].	53
Figura 15. Efectos de diferentes sistemas de curado sobre la resistencia a flexión del HMAR con diferentes porcentajes de CV [26].	54
Figura 16. Resultados de la resistencia a la flexión de mezclas de HMAR bajo diferentes regímenes de curado [38].	55
Figura 17. Efecto del método de curado sobre la resistencia a la tracción del HMAR [78].	57
Figura 18. Retracción autógena del HMAR [27].	60
Figura 19. Retracción autógena del HMAR con CCA con diferentes tamaños de partícula [63].	61
Figura 20. Resultados de la retracción autógena de diferentes mezclas con CR [43].	61
Figura 21. Máxima expansión de hormigones contaminados con yeso [78].	62



Figura 22. Porosidad del HMAR con diferentes MCS [22].	64
Figura 23. Disminución relativa del peso después de un ciclo hielo-deshielo [119].	66
Figura 24. Variación de la temperatura interna de los diferentes tipos hormigón durante los primeros 30 minutos [120].	67
Figura 25. Gärtnerplatz Bridge, Kassel, Germany [124].	69
Figura 26. Puente Wild-Brücke de Mühlgraben, en Austria [125].	70
Figura 27. Viaductos de Chillon, en Suiza [126].	70
Figura 28. Pasarela de HMAR sobre el Barranco de las Ovejas, España.	71
Figura 29. Pasarela Formex® Howe sobre la V-21, España.	72
Figura 30. Pasarela peatonal de Guadasuar, España.	72
Figura 31. Mars Hill Bridge, Wapello County, IA [11].	73
Figura 32. Jakway Park Bridge, Buchanan County, IA [11].	73
Figura 33. Pedestrian bridge, Sherbrooke, Quebec, Canada [11].	74
Figura 34. Nipigon River Bridge en Ontario, Canadá [126].	74
Figura 35. The Shepherds Creek bridge, Australia [129].	75
Figura 36. Sakata-Mirai bridge, Sakata, Japan [11].	75
Figura 37. Haneda International Airport, Tokyo [130].	76
Figura 38. Footbridge of Peace, Seoul, South Korea [11].	77
Figura 39. Arenas silíceas.	83
Figura 40. Celdas de flotación.	85
Figura 41. Proceso de obtención de los finos del lavadero de la mina.	85
Figura 42. Instalación de escurrido de residuos.	86
Figura 43. Proceso de obtención de los finos de la mina de fluorita.	86
Figura 44. Proceso de obtención de la arena residual de mina.	86
Figura 45. Cantera de granito.	87
Figura 46. Proceso de obtención de los finos de granito.	88
Figura 47. Proceso de obtención de los gruesos de granito.	88
Figura 48. Proceso de obtención de los finos de granito con restos de granalla.	89
Figura 49. Humo de sílice.	90
Figura 50. Fibra de acero.	91
Figura 51. Muestra Viscocrete 225.	91



Figura 52. Tamizadora.....	92
Figura 53. Equipo de difracción laser LS 13 320.....	93
Figura 54. Curvas granulométricas arenas silíceas y gruesos de granito.....	93
Figura 55. Curvas granulométricas de los finos.....	94
Figura 56. Molde y pisón empleados.....	95
Figura 57. Muestra arena silícea 0/0,5 mm con superficie seca.....	95
Figura 58. Muestras del árido al baño María.....	96
Figura 59. Determinación de la densidad de las partículas.....	97
Figura 60. Equipo para determinar la densidad real de los finos.....	99
Figura 61. Picnómetro de He modelo AccuPyC 1330.....	100
Figura 62. Funcionamiento del picnómetro de helio.....	101
Figura 63. Probeta cilíndrica graduada y pistón.....	102
Figura 64. Ensayo de equivalente de arena.....	103
Figura 65. Procedimiento de medida del ensayo.....	104
Figura 66. Equipo de fusión por inducción.....	105
Figura 67. Espectrómetro para fluorescencia de rayos X Philips PW 2404.....	106
Figura 68. Amasadora de mortero para hormigones de prueba.....	107
Figura 69. Amasadora utilizada para fabricar el HMARF.....	109
Figura 70. Serie de moldes empleados para la fabricación del HMARF.....	110
Figura 71. Probetas en la cámara húmeda.....	111
Figura 72. Equipo de refrentado.....	111
Figura 73. Molde para ensayo de consistencia.....	112
Figura 74. Ensayo de consistencia del HMARF.....	113
Figura 75. Ensayo de resistencia a compresión.....	114
Figura 76. Ensayo de módulo elástico.....	115
Figura 77. Probeta preparada para el ensayo de módulo de elasticidad.....	116
Figura 78. Panel de control.....	117
Figura 79. Maquina multiensayos.....	118
Figura 80. Probeta prismática instrumentada.....	119
Figura 81. Medición del parámetro d.....	119
Figura 82. Sistema de medición ARAMIS.....	120



Figura 83. Esquema de coordenadas imagen y objeto.....	121
Figura 84. Píxeles adhesivos.....	122
Figura 85. Orientación de la probeta a ensayar.....	122
Figura 86. Ensayo flexotracción con modelo ARAMIS 5M.....	123
Figura 87. Deformación del HMARF.....	123
Figura 88. Curva carga-flecha ensayo flexotracción y puntos clave [158].....	125
Figura 89. Ley constitutiva a tracción del HMARF [158].....	126
Figura 90. Probetas empleadas para determinar la retracción.....	127
Figura 91. Reloj comparador.....	128
Figura 92. Equipo para determinar la absorción y porosidad abierta del HMARF.....	129
Figura 93. Probetas en campana de vacío.....	130
Figura 94. Consistencia del HMARF con FG.....	132
Figura 95. Consistencia del HMARF con FGG.....	133
Figura 96. Consistencia del HMARF con GG.....	133
Figura 97. Consistencia del HMARF con FM.....	134
Figura 98. Consistencia del HMARF con LM.....	134
Figura 99. Consistencia del HMARF con AM.....	135
Figura 100. Consistencia del HMARF con sustitución de la harina de sílice.....	137
Figura 101. Consistencia del HMARF con sustitución de la arena sílicea.....	138
Figura 102. Densidad media del HMARF con FG.....	139
Figura 103. Densidad media del HMARF con FGG.....	140
Figura 104. Densidad media del HMARF con GG.....	140
Figura 105. Densidad media del HMARF con FM.....	141
Figura 106. Densidad media del HMARF con LM.....	142
Figura 107. Densidad media del HMARF con AM.....	142
Figura 108. Densidad media del HMARF con sustitución de la harina de sílice.....	144
Figura 109. Densidad media del HMARF con sustitución de la arena sílicea.....	145
Figura 110. Absorción de agua del HMARF con FG.....	146
Figura 111. Absorción de agua del HMARF con FGG.....	147
Figura 112. Absorción de agua del HMARF con GG.....	147
Figura 113. Absorción de agua del HMARF con FM.....	148



Figura 114. Absorción de agua del HMARF con LM.	148
Figura 115. Absorción de agua del HMARF con AM.	149
Figura 116. Absorción de agua del HMARF con sustitución de la harina de sílice.	150
Figura 117. Absorción de agua del HMARF con sustitución de la arena sílicea.	151
Figura 118. Resistencia a compresión del HMARF con FG.	152
Figura 119. Resistencia a compresión del HMARF con FGG.	153
Figura 120. Resistencia a compresión del HMARF con GG.	153
Figura 121. Resistencia a compresión del HMARF con FM.	154
Figura 122. Resistencia a compresión del HMARF con LM.	155
Figura 123. Resistencia a compresión del HMARF con AM.	155
Figura 124. Resistencia a compresión del HMARF con sustitución de la harina de sílice.	157
Figura 125. Resistencia a compresión del HMARF con sustitución de la arena sílicea.	158
Figura 126. Módulo de elasticidad del HMARF con FG.	159
Figura 127. Módulo de elasticidad del HMARF con FGG.	160
Figura 128. Módulo de elasticidad del HMARF con GG.	160
Figura 129. Módulo de elasticidad del HMARF con FM.	161
Figura 130. Módulo de elasticidad del HMARF con LM.	162
Figura 131. Módulo de elasticidad del HMARF con AM.	162
Figura 132. Módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la harina de sílice.	164
Figura 133. Módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la arena sílicea.	165
Figura 134. Variación del módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la harina de sílice.	168
Figura 135. Variación del módulo de elasticidad del HMARF con sustitución de la arena sílicea.	169
Figura 136. Resistencia a flexión del HMARF con FG.	170
Figura 137. Resistencia a flexión del HMARF con FGG.	171
Figura 138. Resistencia a flexión del HMARF con GG.	171
Figura 139. Resistencia a flexión del HMARF con FM.	172
Figura 140. Resistencia a flexión del HMARF con LM.	173
Figura 141. Resistencia a flexión del HMARF con AM.	173
Figura 142. Resistencia a flexión del HMARF con sustitución de la harina de sílice.	175
Figura 143. Resistencia a flexión del HMARF con sustitución de la arena sílicea.	177
Figura 144. Comportamiento a tracción del HMARF con FG.	179



Figura 145. Comportamiento a tracción del HMARF con FGG.....	181
Figura 146. Comportamiento a tracción del HMARF con GG.....	182
Figura 147. Comportamiento a tracción del HMARF con FM.....	184
Figura 148. Comportamiento a tracción del HMARF con LM.....	185
Figura 149. Comportamiento a tracción del HMARF con AM.....	187
Figura 150. Resistencia a tracción del HMARF con sustitución de la harina de sílice.....	188
Figura 151. Resistencia a tracción del HMARF con sustitución de la arena sílicea.....	189
Figura 152. Retracción del HMARF con FG.....	190
Figura 153. Retracción del HMARF con FGG.....	191
Figura 154. Retracción del HMARF con GG.....	191
Figura 155. Retracción del HMARF con FM.....	192
Figura 156. Retracción del HMARF con LM.....	193
Figura 157. Retracción del HMARF con AM.....	193
Figura 158. Curvas tensión-flecha del HMARF de control.....	249
Figura 159. Curvas tensión-flecha del HMARF de control A.....	249
Figura 160. Curvas tensión-flecha del HMARF de control B.....	250
Figura 161. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% FG.....	250
Figura 162. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% FG.....	251
Figura 163. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FG.....	251
Figura 164. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FG.....	252
Figura 165. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% FM.....	252
Figura 166. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% FM.....	253
Figura 167. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FM (A).....	253
Figura 168. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FM (B).....	254
Figura 169. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FM.....	254
Figura 170. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% AM.....	255
Figura 171. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% AM.....	255
Figura 172. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% AM (A).....	256
Figura 173. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% AM (B).....	256
Figura 174. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% AM (A).....	257
Figura 175. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% AM (B).....	257



Figura 176. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% LM.	258
Figura 177. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% LM.	258
Figura 178. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% LM.	259
Figura 179. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% LM.	259
Figura 180. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% GG.....	260
Figura 181. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% GG.....	260
Figura 182. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% GG.....	261
Figura 183. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% GG.....	261
Figura 184. Curvas tensión-flecha del HMARF con 35% FGG.....	262
Figura 185. Curvas tensión-flecha del HMARF con 50% FGG.....	262
Figura 186. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FGG (A).....	263
Figura 187. Curvas tensión-flecha del HMARF con 70% FGG (B).....	263
Figura 188. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FGG (A).....	264
Figura 189. Curvas tensión-flecha del HMARF con 100% FGG (B).....	264
Figura 190. Curvas tensión-flecha del HMARF sin fibra de acero.....	265